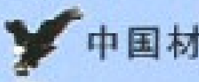
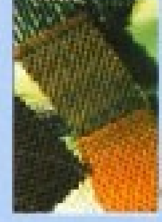
中国材料工程大典

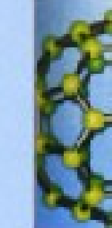
中国机械工程学会　中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会





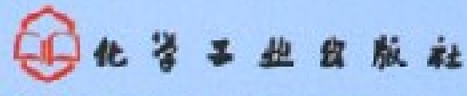






第23卷　材料焊接工程（下）

史耀武　主编



化学工业出版社

CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON

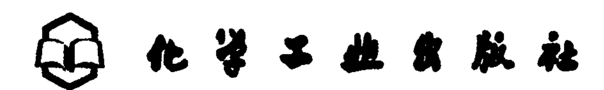
中国材料工程大典

中国机械工程学会 中国材料研究学会

中国材料工程大典编委会

第23卷 材料焊接工程（下）

史耀武 主编



·北 京·

（京）新登字 039 号

内 容 简 介

中国材料工程大典是中国机械工程学会和中国材料研究学会共同组织全国 39 位院士、百余位各学科带头人、千余位材料工程专家共同执笔编写，全面反映当今国内外材料工程领域发展的最新资料和最新成果，集实用性、先进性和权威性于一体的大型综合性工具书。中国材料工程大典包括材料工程基础、钢铁材料工程、有色金属材料工程、高分子材料工程、无机非金属材料工程、复合材料工程、信息功能材料工程、粉末冶金材料工程、材料热处理工程、材料表面工程、材料铸造成形工程、材料塑性成形工程、材料焊接工程、材料特种加工成形工程、材料表征与检测技术等内容，涵盖了材料工程的各个领域，将最新的实用数据（特别是与国际接轨的标准数据）、图表与先进实用的科研成果系统地集合起来，并附应用实例，充分展示了材料工程各领域的现状和未来。中国材料工程大典不仅可以满足现代企业正确选材，合理用材，应用先进的材料成形加工技术，提高产品质量和性能，降低产品成本，增强产品市场竞争力的需要，而且对推动中国材料科学与材料成形加工技术的不断创新，促进制造业的发展，提高我国制造业的竞争能力，具有重要的现实意义。

本书为第 23 卷，材料焊接工程（下）。主要内容包括材料焊接、焊接生产过程自动化、焊接结构设计、焊接结构制造、焊接生产质量管理与无损检测、焊接结构服役与再制造等。

本书主要供具有大专以上文化水平，从事材料工程研究的工程技术人员在综合研究和处理材料焊接工程的各类技术问题时使用，起备查、提示和启发的作用，也可供研究人员、理工院校的有关师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

中国材料工程大典．第 23 卷，材料焊接工程．下/史耀武主编．—北京：化学工业出版社，2005.8
ISBN 7-5025-7325-9

Ⅰ．中…　Ⅱ．史…　Ⅲ．①材料科学 ②金属材料－焊接　Ⅳ．①TB3 ②TG457

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 094412 号

中国材料工程大典
第 23 卷
材料焊接工程（下）
中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会
史耀武　主编
责任编辑：周国庆　陈志良　李骏带
责任校对：顾淑云
封面设计：雷嘉琦

*

化学工业出版社出版发行
（北京市朝阳区惠新里 3 号　邮政编码：100029）
购书咨询：（010）64982530
（010）64918013
购书传真：（010）64982630
http://www.cip.com.cn

*

新华书店北京发行所经销
北京蓝海印刷有限公司印装
开本 880mm×1230mm 1/16　印张 73¼　字数 3436 千字
2006 年 1 月第 1 版　2006 年 1 月北京第 1 次印刷
ISBN 7－5025－7325－9
定价：200.00 元

序

材料是当代社会经济发展的物质基础，也是制造业发展的基础和重要保障。进入21世纪以来，随着经济全球化的发展和中国的崛起，现代制造业的重心正不断向中国转移。据统计，今天中国制造业直接创造国民生产总值的1/3以上，约占全国工业生产的4/5，为国家财政提供1/3以上的收入，占出口总额的90%。但是与发达国家相比，我国制造业的水平不高、自主创新能力不足、高端市场竞争力还不强。我国虽然已是世界制造业大国，但还不是世界制造业强国。在有关因素中，材料工程基础薄弱是制约我国制造业发展的关键因素。广义的材料工程包括材料制备、测试和加工成形过程。为了提高我国制造业的水平和竞争力，突破材料工程这个薄弱环节，中国机械工程学会和中国材料研究学会牵头，会同中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会共同组织编撰《中国材料工程大典》（简称《材料大典》），其目的是力图为我国制造业提供一部集科学性、先进性和实用性于一体的综合性专业工具书。以满足广大科技工作者的迫切需求，为科技自主创新和我国制造业的崛起加强技术基础。

经过5年多的艰苦努力，《材料大典》终将出版了。这部共26卷约7000万字的巨著，是39位两院院士和1200余位参编专家教授们辛勤劳动的智慧结晶。有的作者为此牺牲了健康，如一位退休了的总工程师，为了把他多年的研究成果和实践经验写成书稿，由于长时间写作，导致眼睛视网膜脱落……。这种敬业精神与坚强毅力是值得我们学习铭记的。借此机会，我们要感谢中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会的支持。这些学会的众多专家教授积极参与了《材料大典》编写工作，与中国机械工程学会和中国材料研究学会的专家教授一起完成这项艰巨任务，从而使《材料大典》在完整性与先进性、科学性与实用性的结合上得到了加强；我们要感谢科学技术部、国防科学技术工业委员会、国家自然科学基金委员会、中国科学技术协会、中国科学院、中国工程院，以及各协作单位对编写工作的大力支持和积极帮助；我们也要感谢师昌绪院士等顾问的殷切指导，他们在编委会的两次工作会议上提出了许多重要的意见和建议，平时也给予了经常关心和指导，使我们少走了许多弯路；我们还要对关心和支持《材料大典》编写工作的科研院所、院校、企业以及有关人员表示感谢。没有大家的支持与协同，就不可能有《材料大典》的成功编写和顺利出版。

《材料大典》既总结了10多年来在材料工程方面的最新数据、图表及科研成果，还汇集了国内外在材料工程方面的成熟经验和先进理念，它体现了科学性、先进性和实用性的结合。可供具有大专以上文化水平的有关工程技术人员查阅使用，也可供理工院校的师生参考。

编撰《材料大典》涉及范围广，难度大，书中不可避免地会存在一些缺点和不足之处，恳请各位读者指正。

中国机械工程学会理事长

中国材料工程大典编委会主任

2005年9月23日

前　言

《材料焊接工程》卷是《中国材料工程大典》中的卷目之一。

焊接技术的应用涉及能源、交通、航空航天、建筑工程、电气工程、微电子等几乎所有现代制造业。焊接俗称钢铁裁缝。如40%的钢铁材料需经过焊接加工才能成为有用的结构或产品。可以想象焊接在国民的生产生活、财富创造、国防建设及劳动就业中将起到多么重大的作用。

随着冶金及材料科学的发展、计算机及网络技术的广泛应用，材料焊接理论及焊接制造技术得到了空前的迅猛发展，现代焊接技术已能基本满足当前生产的需求。但目前仍存在诸多迫切需要解决的问题，如焊接技术仍过分依赖经验和试验，需要科学的理论和方法指导；焊工的劳动条件仍较差，应大力推广焊接机器人的应用，开发灵巧并有智能的焊接机械或自动化焊接设备，使工作脱离艰苦的工作环境。为了实现清洁生产及可持续发展战略，需要开发节能、节材、无污染的焊接生产装备和焊接材料，降低焊接制造成本，提高企业管理水平和人员素质。特别是在新能源、太空及海洋的开发中，焊接技术仍面临巨大的挑战。为此，《中国材料工程大典》中的《材料焊接工程》卷的编写和出版，正是适应了这一形势发展的需求。

《材料焊接工程》卷（上、下卷）是一部集实用性、先进性和权威性于一体的焊接专业技术工具书。主要内容包括：概论、材料焊接加工技术基础、焊接方法与设备、材料焊接、焊接生产过程自动化、焊接结构设计、焊接结构制造、焊接生产质量管理与无损检测、焊接结构服役与再制造等9篇共67章，约600余万字。来自全国著名大学、研究院所及企业的80余位专家教授，历时3年多时间共同完成这部著作的编写工作。本书全面系统地反映了我国焊接技术的发展及取得的成就和经验，并介绍了国内外的先进焊接技术。在内容安排上，既立足全局，又突出重点。本书主要供从事制造业和材料工程的科技人员在工作中查阅使用，也可以供研究人员、管理人员和高等院校师生参考。

感谢中国机械工程学会、中国材料研究学会、中国材料工程大典编委会、中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会对本卷编写工作的指导与大力支持，感谢有关单位及个人对编写工作的积极参与和热情帮助，使得编写工作能顺利完成。由于编写时间紧迫和编者水平所限，书中的不当之处，恳请读者指正并提出宝贵意见。

史耀武

2005年9月9日

目　录




蓝天CAD论坛
CNCAD.NET


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET



第4篇

材 料 焊 接

主 编 史耀武 任家烈

编 写 任家烈 夏志东 杨建华 田志凌 陈裕川
薛 锦 潘希德 毛 唯 魏祚伟 焦好军
郭绍庆 张学军 包芳涵 何 鹏 冯吉才
刘黎明 常保华 单际国 董祖珏 吴爱萍

审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET



第 1 章　碳钢的焊接

1　常见焊接用碳钢的认识

1.1　常见焊接用碳钢及碳钢铸件的成分和性能

1.1.1　普通碳素结构钢

表 4.1-1 和表 4.1-2 分别为普通碳素钢的化学成分及其力学性能。

1.1.2　优质碳素结构钢

表 4.1-3 和表 4.1-4 分别为优质碳素结构钢的化学成分和力学性能。

表 4.1-1　普通碳素结构钢化学成分（质量分数）（摘自 GB 700—1988）　　%

牌　号	等　级	化学成分 C	Mn	Si①	S	P	脱氧方法
				≤			
Q195	—	0.06～0.12	0.25～0.50	0.30	0.050	0.045	F、b、Z
Q215	A	0.09～0.15	0.25～0.55	0.30	0.050	0.045	F、b、Z
	B				0.045		
Q235	A	0.14～0.22	0.30～0.65②	0.30	0.050	0.045	F、b、Z
	B	0.12～0.20	0.30～0.70②		0.045		
	C	≤0.18	0.35～0.80		0.040	0.040	Z
	D③	≤0.17			0.035	0.035	TZ
Q255	A	0.18～0.28	0.40～0.70	0.30	0.050	0.045	F、b、Z
	B				0.045		
Q275	—	0.28～0.38	0.50～0.80	0.35	0.050	0.045	b、Z

① 沸腾钢硅含量不大于 0.07%，半镇静钢硅含量不大于 0.17%，镇静钢硅含量下限为 0.12%。

② Q235 A 和 B 级沸腾钢锰含量上限为 0.60%。

③ D 级钢应有足够的形成细晶粒组织的元素。

表 4.1-2　普通碳素结构钢力学性能（摘自 GB 700—1988）

牌号	等级	拉伸试验≥ 屈服强度 σ_s/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%	冲击试验 温度 t/℃	夏比 V 形缺口冲击吸收功（纵向）/J	冷弯试验 $b=2a$　180° 钢材厚度（直径）/mm		弯心直径 d ≤60	>60～100	>100～200
Q195	—	195	315～430	33	—	—	试样方向	纵	0	—	—
								横	0.5a		
Q215	A	215	335～450	31	—	—		纵	0.5a	1.5a	2a
	B				20	≥27		横	a	2a	2.5a
Q235	A	235	375～500	26	—	—		纵	a	2a	2.5a
	B				20	≥27					
	C				0			横	1.5a	2.5a	3a
	D				−20						
Q255	A	255	410～550	24	—	—		—	2a	3a	3.5a
	B				20	≥27					
Q275	—	275	490～630	20	—	—		—	3a	4a	4.5a

注：1. 屈服强度和伸长率要求数值，皆对钢材厚度不大于 16 mm 而言，厚度增加时，这些数值要求降低（详见 GB700—1988）。

2. Q195 的屈服强度值仅供参考，不作交货条件。

3. 冷弯试验中，b 为试样宽度，a 为钢材厚度（直径），d 为弯心直径。以下其他表中涉及冷弯试验时符号含义相同。



表 4.1-3　优质碳素结构钢化学成分（质量分数）（摘自 GB/T 699—1999）　%

<table>
<tr><th rowspan="3">牌号</th><th colspan="8">化　学　成　分</th></tr>
<tr><th rowspan="2">C</th><th rowspan="2">Si</th><th rowspan="2">Mn</th><th>P</th><th>S</th><th>Ni</th><th>Cr</th><th>Cu</th></tr>
<tr><th colspan="5">≤</th></tr>
<tr><td>08F</td><td>0.05～0.11</td><td>≤0.03</td><td rowspan="3">0.25～0.50</td><td rowspan="31">0.035①
0.030②
0.025③</td><td rowspan="31">0.035①
0.030②
0.020③</td><td rowspan="31">0.30</td><td>0.10</td><td rowspan="31">0.25</td></tr>
<tr><td>10F</td><td>0.07～0.13</td><td rowspan="2">≤0.07</td><td>0.15</td></tr>
<tr><td>15F</td><td>0.12～0.18</td><td>0.25</td></tr>
<tr><td>08</td><td>0.05～0.11</td><td rowspan="28">0.17～0.37</td><td rowspan="4">0.35～0.65</td><td>0.10</td></tr>
<tr><td>10</td><td>0.07～0.13</td><td>0.15</td></tr>
<tr><td>15</td><td>0.12～0.18</td><td rowspan="26">0.25</td></tr>
<tr><td>20</td><td>0.17～0.23</td></tr>
<tr><td>25</td><td>0.22～0.29</td><td rowspan="13">0.50～0.80</td></tr>
<tr><td>30</td><td>0.27～0.34</td></tr>
<tr><td>35</td><td>0.32～0.39</td></tr>
<tr><td>40</td><td>0.37～0.44</td></tr>
<tr><td>45</td><td>0.42～0.50</td></tr>
<tr><td>50</td><td>0.47～0.55</td></tr>
<tr><td>55</td><td>0.52～0.60</td></tr>
<tr><td>60</td><td>0.57～0.65</td></tr>
<tr><td>65</td><td>0.62～0.70</td></tr>
<tr><td>70</td><td>0.67～0.75</td></tr>
<tr><td>75</td><td>0.72～0.80</td></tr>
<tr><td>80</td><td>0.77～0.85</td></tr>
<tr><td>85</td><td>0.82～0.90</td></tr>
<tr><td>15Mn</td><td>0.12～0.18</td><td rowspan="9">0.70～1.00</td></tr>
<tr><td>20Mn</td><td>0.17～0.23</td></tr>
<tr><td>25Mn</td><td>0.22～0.29</td></tr>
<tr><td>30Mn</td><td>0.27～0.34</td></tr>
<tr><td>35Mn</td><td>0.32～0.39</td></tr>
<tr><td>40Mn</td><td>0.37～0.44</td></tr>
<tr><td>45Mn</td><td>0.42～0.50</td></tr>
<tr><td>50Mn</td><td>0.48～0.56</td></tr>
<tr><td>60Mn</td><td>0.57～0.65</td></tr>
<tr><td>65Mn</td><td>0.62～0.70</td><td rowspan="2">0.90～1.20</td></tr>
<tr><td>70Mn</td><td>0.67～0.75</td></tr>
</table>

① 优质钢。
② 高级优质钢。
③ 特级优质钢。

表 4.1-4　优质碳素结构钢力学性能（摘自 GB/T 699—1999）

<table>
<tr><th rowspan="3">牌　号</th><th rowspan="3">试样毛坯尺寸/mm</th><th colspan="3">推荐热处理/℃</th><th colspan="5">力 学 性 能</th><th colspan="2" rowspan="2">钢材交货状态硬度
HBS10/3 000
≤</th></tr>
<tr><th rowspan="2">正火</th><th rowspan="2">淬火</th><th rowspan="2">回火</th><th>σ_b
/MPa</th><th>σ_s
/MPa</th><th>δ_5
/%</th><th>ψ
/%</th><th>A_{KU_2}
/J</th></tr>
<tr><th colspan="5">≥</th><th>未热处理</th><th>退火钢</th></tr>
<tr><td>08F</td><td>25</td><td>930</td><td></td><td></td><td>295</td><td>175</td><td>35</td><td>60</td><td></td><td>131</td><td></td></tr>
<tr><td>10F</td><td>25</td><td>930</td><td></td><td></td><td>315</td><td>185</td><td>33</td><td>55</td><td></td><td>137</td><td></td></tr>
<tr><td>15F</td><td>25</td><td>920</td><td></td><td></td><td>355</td><td>205</td><td>29</td><td>55</td><td></td><td>143</td><td></td></tr>
<tr><td>08</td><td>25</td><td>930</td><td></td><td></td><td>325</td><td>195</td><td>33</td><td>60</td><td></td><td>131</td><td></td></tr>
</table>



续表 4.1-4

牌　号	试样毛坯尺寸/mm	推荐热处理/℃			力学性能					钢材交货状态硬度 HBS10/3 000 ≤	
		正火	淬火	回火	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	ψ /%	A_{KU_2} /J	未热处理	退火钢
					≥						
10	25	930			335	205	31	55		137	
15	25	920			375	225	27	55		143	
20	25	910			410	245	25	55		156	
25	25	900	870	600	450	275	23	50	71	170	
30	25	880	860	600	490	295	21	50	63	179	
35	25	870	850	600	530	315	20	45	55	197	
40	25	860	840	600	570	335	19	45	47	217	187
45	25	850	840	600	600	355	16	40	39	229	197
50	25	830	830	600	630	375	14	40	31	241	207
55	25	820	820	600	645	380	13	35		255	217
60	25	810			675	400	12	35		255	229
65	25	810			695	410	10	30		255	229
70	25	790			715	420	9	30		269	229
75	试样		820	480	1 080	880	7	30		285	241
80	试样		820	480	1 080	930	6	30		285	241
85	试样		820	480	1 130	980	6	30		302	255
15Mn	25	920			410	245	26	55		163	
20Mn	25	910			450	275	24	50		197	
25Mn	25	900	870	600	490	295	22	50	71	207	
30Mn	25	880	860	600	540	315	20	45	63	217	187
35Mn	25	870	850	600	560	335	19	45	55	229	197
40Mn	25	860	840	600	590	355	17	45	47	229	207
45Mn	25	850	840	600	620	375	15	40	39	241	217
50Mn	25	830	830	600	645	390	13	40	31	255	217
60Mn	25	810			695	410	11	35		269	229
65Mn	25	830			735	430	9	30		285	229
70Mn	25	790			785	450	8	30		285	229

1.1.3　专门用途的碳素结构钢

(1) 船体用一般强度钢

表 4.1-5 和表 4.1-6 分别为船体用一般强度钢的化学成分和力学性能。

(2) 焊接气瓶用碳素结构钢

表 4.1-7 和表 4.1-8 分别为焊接气瓶用碳素结构钢的化学成分和力学性能。

(3) 压力容器用碳素钢

表 4.1-9 和表 4.1-10 分别为压力容器用碳素钢的化学成分和力学性能。

(4) 压力容器用碳素钢厚钢板

表 4.1-11 ~ 表 4.1-13 分别为压力容器用碳素钢厚钢板的化学成分、常温及高温力学性能。

(5) 锅炉用碳素钢

表 4.1-14 和表 4.1-15 分别为锅炉用碳素钢的化学成分和力学性能。

(6) 锅炉用碳素钢厚钢板

表 4.1-16 ~ 表 4.1-18 分别为锅炉用碳素钢厚钢板的化学成分、常温和高温力学性能。

(7) 桥梁用碳素结构钢

表 4.1-19 和表 4.1-20 分别为桥梁用碳素结构钢的化学成分和力学性能。



表 4.1-5　船体用碳素结构钢化学成分（质量分数）（摘自 GB 712—2000）　　%

钢类	等级	化学成分（熔炼成分）								
		C	Mn	Si	P	S	Als	Cr	Ni	Cu
一般强度钢	A	≤0.21	≥2.5C	≤0.50	≤0.035	≤0.035	—	≤0.30	≤0.30	≤0.35
	B	≤0.21	0.80～1.20	≤0.35			—			
	D	≤0.21	0.60～1.20				≥0.015			
	E	≤0.18	0.70～1.20				≥0.015			

注：型钢含碳量上限可到 0.23%；当 B 级钢做冲击试验时，锰含量下限可到 0.60%。

表 4.1-6　船体用碳素结构钢力学性能（摘自 GB 712—2000）

钢材等级	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ /%	试验温度 t/℃	吸收功 A_{KV}/J≥ 厚度/mm ≤50 纵向	≤50 横向	>50～70 纵向	>50～70 横向	>70～100 纵向	>70～100 横向	冷弯试验 窄冷弯 $b=2a$ 80°	冷弯试验 宽冷弯 $b=5a$ 120°
A	≥235	400～520	≥22	20	—	—	34	23	41	27	$d=2a$	—
B				0	27	20					—	$d=3a$
D				−20							—	
E				−40							—	

表 4.1-7　焊接气瓶用碳素结构钢化学成分（质量分数）（摘自 GB 6653—1994）　　%

牌　号	化学成分						
	C	Mn	Si	P	S	P+S	Als
HP245	≤0.16	≤0.60	≤0.35	≤0.035		≤0.060	≥0.015
HP265	≤0.19	≤0.80					
HP295	≤0.20	≤1.00					
HP325		≤1.5					
HP345							
HP365							

注：1. 牌号中 HP 为“焊接气瓶”汉语拼音的缩写。

2. 冷轧退火钢板在保证性能的情况下，HP245、HP265 碳含量上限允许到 0.20%；锰含量上限允许到 1.00%。

3. 为改善钢的性能，各牌号钢中可加入 V、Nb、Ti 等微量元素的一种或几种，但应符合以下规定：V≤0.12%，Nb≤0.060%，Ti≤0.20%。

4. 各牌号钢中残余元素含量 Cr、Ni、Mo 各不大于 0.30%，Cu 不大于 0.20%，供方如能保证可不作分析。

表 4.1-8　焊接气瓶用碳素结构钢力学性能（摘自 GB 6653—1994）

牌　号	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 /%	冷弯试验 180°	冲击试验 温度	冲击试验 方向	冲击试验 尺寸 /mm	冲击试验 V形冲击吸收功/J
	不小于							
HP245	≥245	≥390	≥28	$d=1.5a$	常温	横向	5×10 10×10	15 27
HP265	≥265	≥410	≥27					
HP295	≥295	≥440	≥26	$d=2a$				
HP325	≥325	≥490	≥21					
HP345	≥345	≥510	≥20					
HP365	≥365	≥540	≥20					

表 4.1-9　压力容器用碳素钢化学成分（质量分数）（摘自 GB 6654—1996）　　%

牌　号	化学成分							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	S	P
20R	≤0.20	0.40～0.90	0.15～0.30	≤0.30	≤0.30	≤0.30	≤0.020	≤0.030

注：1. 钢号中 R 为“容”汉语拼音首位字母，数字代表平均含碳量为万分之二十。

2. 厚度大于 60 mm 时，锰含量上限可以提高到 1.00%。

3. Cr、Ni、Cu 总含量≤0.6%。

4. 为改善钢的性能，可添加微量合金元素。



表 4.1-10　压力容器用碳素钢力学性能（摘自 GB 6654—1996）

牌号	交货状态	钢板厚度 /mm	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	伸长率 δ_5 /%	V 形冲击吸收功/J 横向试样	冷弯试验 $b=2a$ 180°
				≥			
20R	热轧、控轧式正火	6 ~ 16	400 ~ 520	245	25	27（0℃）	$d=2a$
		> 16 ~ 36		235			
		> 36 ~ 60		225			
		> 60 ~ 100	390 ~ 510	205	24		

表 4.1-11　压力容器用碳素钢厚钢板化学成分（质量分数）（摘自 YB［T］40—1987）　%

牌号	化学成分 C	Mn	Si	S	P
20R	≤0.20	0.40 ~ 0.80	0.15 ~ 0.30	≤0.030	≤0.030

表 4.1-12　压力容器用碳素钢厚钢板力学性能（摘自 YB［T］40—1987）

牌　号	交货状态	钢板厚度 /mm	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	伸长率 δ_5 /%	V 形常温冲击吸收功/J 横向试样	冷弯试验 $b=2a$ 180°
				不小于			
20R	热轧或正火	6 ~ 16	400 ~ 510	245	26	34	$d=1.5a$
		17 ~ 25		235	25		
		26 ~ 36		225	24		$d=2a$
		38 ~ 60		215	23		
		> 60 ~ 100	390 ~ 500	205	22		$d=2.5a$
		> 100 ~ 120		185	22		

表 4.1-13　压力容器用碳素钢厚钢板高温力学性能（摘自 YB［T］40—1987）

牌　号	厚度 /mm	试验温度 t/℃ 200	250	300	350	400	450
		高温屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa≥					
20R	21 ~ 25	185	165	150	135	130	125
	26 ~ 36	175	160	145	130	125	120
	38 ~ 60	165	150	135	125	120	115
	> 60 ~ 100	160	145	130	120	115	105
	> 100 ~ 200	150	135	120	110	105	95

注：按需方要求，厚度大于 20 mm 的钢板可进行高温拉伸试验。

表 4.1-14　锅炉用碳素钢化学成分（质量分数）（摘自 GB 713—1997）　%

牌号	化学成分 C	Si	Mn	S	P
20g	≤0.20	0.15 ~ 0.30	0.50 ~ 0.90	≤0.035	≤0.035
22Mng	≤0.30	0.15 ~ 0.40	0.90 ~ 1.50	≤0.025	≤0.025

注：1. 钢号中 g 为“锅”汉语拼音首位字母，数字代表平均含碳量为万分之几。
2. 20g 钢板在满足性能要求的情况下，锰含量的下限可为 0.40%。
3. 对于厚度大于 25 mm 的钢板碳含量最大可到 0.22%。

表 4.1-15 锅炉用碳素钢力学性能（摘自 GB 713—1997）

牌号	交货状态	钢板厚度 /mm	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	伸长率 δ_5 /%	常温冲击功 A_{KV} /J	时效冲击韧度 a_{KU} /J·cm^{-2}	冷弯试验 $b=2a$ 180°
						横向试样		
				≥				
20g	热轧、控轧、正火及正火加回火	6 ~ ≤16	400 ~ 530	245	26	27	29	$d=1.5a$
		>16 ~ ≤25	400 ~ 520	235	25			
		>25 ~ ≤36		225	24			
		>36 ~ ≤60		225	23			$d=2a$
		>60 ~ ≤100	390 ~ 510	205	22			$d=2.5a$
		>100 ~ ≤150	380 ~ 500	185				
22Mng		>25	515 ~ 655	275	19			$d=4a$

表 4.1-16 锅炉用碳素钢厚钢板化学成分（质量分数）（摘自 YB [T] 41—1987） %

牌号	化学成分				
	C	Si	Mn	S	P
20g	≤0.20	0.15 ~ 0.30	0.40 ~ 0.80	≤0.030	≤0.030
22g	≤0.26	0.17 ~ 0.37	0.60 ~ 0.90	≤0.030	≤0.030

表 4.1-17 锅炉用碳素钢厚钢板力学性能（摘自 YB [T] 41—1987）

牌号	交货状态	钢板厚度 /mm	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	伸长率 δ_5 /%	常温冲击吸收功 A_{KV}/J	时效冲击韧度 a_{KU} /J·cm^{-2}	冷弯试验 $b=2a$ 180°
						横向试样		
				≥				
20g	热轧或热处理	6 ~ 16	400 ~ 510	245	26	27	34	$d=1.5a$
		17 ~ 25		235	25			
		26 ~ 36		225	24			$d=2a$
		37 ~ 60		215	23			
		>60 ~ 100	390 ~ 500	205	22			$d=2.5a$
		>100 ~ 120		185	22			
22g		6 ~ 60	420 ~ 530	265	24	27	34	$d=2a$

表 4.1-18 锅炉用碳素钢厚钢板高温力学性能（摘自 YB [T] 41—1987）

牌号	厚度 /mm	试验温度 /℃					
		200	250	300	350	400	450
		高温屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa≥					
20g 22g	21 ~ 25	185	165	150	135	130	125
	26 ~ 36	175	160	145	130	125	120
	37 ~ 60	165	150	135	125	120	115
	>60 ~ 100	160	145	130	120	115	105
	>100 ~ 120	150	135	120	110	105	95

注：按需方要求，厚度大于 20 mm 的钢板可进行高温拉伸试验。



表 4.1-19　桥梁用碳素结构钢化学成分（质量分数）（摘自 YB［T］10—1981）　%

牌号	化学成分							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S
16q	0.12～0.20	0.12～0.25	0.40～0.70	≤0.30	≤0.30	≤0.30	≤0.035	≤0.040

注：钢号中 q 为“桥”汉语拼音首位字母，数字代表平均含碳量为万分之几。

表 4.1-20　桥梁用碳素结构钢力学性能（摘自 YB［T］10—1981）

牌号	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 /%	-20℃冲击韧度 a_{kV} /J·cm^{-2}		时效冲击韧度 a_{kVS} /J·cm^{-2}		冷弯试验 $b=2a$ 180°
				横试样	纵试样	横试样	纵试样	
	≥							
16q	225	372	26	27	31	27	31	$d=1.5a$

1.1.4　碳钢铸件

（1）焊接结构用碳钢铸件

表 4.1-21 和表 4.1-22 分别为焊接结构用碳钢铸件的化学成分和力学性能。

（2）一般工程用铸造碳钢

表 4.1-23 和表 4.1-24 分别为一般工程用铸造碳钢的化学成分和力学性能。

表 4.1-21　焊接结构用碳钢铸件化学成分（摘自 GB 7659—1987）　%

牌号	化学成分（质量分数）≤										
	C	Si	Mn	S	P	残余元素					
						Ni	Cr	Cu	Mo	V	总和
ZG200-400H	0.20	0.50	0.80	0.04	0.04	0.30	0.30	0.30	0.15	0.05	0.80
ZG230-450H	0.20	0.50	1.20	0.04	0.04						
ZG275-485H	0.25	0.50	1.20	0.04	0.04						

注：1. 铸钢牌号中“ZG”是“铸钢”二字汉语拼音首位字母。
2. 牌号末尾“H”为“焊”字汉语拼音首位字母，表示焊接用钢。
3. 牌号中两组数字分别代表铸件金属 σ_s 和 σ_b 值，MPa。

表 4.1-22　焊接结构用碳钢铸件力学性能（摘自 GB 7659—1987）

牌号	拉伸性能				冲击性能	
	σ_s/MPa	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%	A_{KV}/J	a_{KU}/J·cm^{-2}
	≥					
ZG200-400H	200	400	25	40	30	59
ZG230-450H	230	450	22	35	25	44
ZG275-485H	275	485	20	35	22	34

注：冲击性能中，仅当供方尚不具备夏比（V 形缺口）试样加工条件时，允许暂按夏比（U 形缺口）试样的冲击韧度 a_{KU} 交货。

表 4.1-23　铸造碳钢的化学成分（摘自 GB/T 11352—1989）　%

牌号	化学成分（质量分数）≤									
	C	Si	Mn	S	P	残余元素				
						Ni	Cr	Cu	Mo	V
ZG200-400	0.20	0.50	0.80	0.04		0.30	0.35	0.30	0.20	0.05
ZG230-450	0.30		0.90							
ZG270-500	0.40									
ZG310-570	0.50	0.60								
ZG340-640	0.60									

注：1. 对上限减少 0.01% 的碳，允许增加 0.04% 的锰。对 ZG200-400，锰最高至 1.00%，其余四个牌号锰高至 1.20%。
2. 残余元素总量不超过 1.00%，如需方无要求，残余元素可不进行分析。
3. 当使用酸性炉生产铸件时，S、P 含量由供需双方商定。



表 4.1-24　铸造碳钢室温下试样力学性能（摘自 GB/T 11352—1989）

牌　号	屈服强度 σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ /%	根据合同选择		
				断面收缩率 ψ /%	冲击韧性	
					A_{KV} /J	a_{KU} /J·cm^{-2}
ZG200-400	200	400	25	40	30	59
ZG230-450	230	450	22	32	25	44
ZG270-500	270	500	18	25	22	34
ZG310-570	310	570	15	21	15	29
ZG340-640	340	640	10	18	10	19

注：以上数据均为最小值。表中所列的各牌号性能，适应于厚度为 100 mm 以下铸件。当铸件厚度超过 100 mm 时，表中规定的 $\sigma_{0.2}$ 屈服强度仅供设计使用。

1.2　碳钢焊接适用的工艺方法及所用焊接材料的进展

表 4.1-25 列出碳钢焊接适用的工艺方法及所用焊接材料的进展。

2　碳钢焊接用材料

2.1　焊条

2.1.1　碳钢电焊条用焊芯化学成分

表 4.1-26 为碳钢电焊条用焊芯化学成分。

表 4.1-25　碳钢焊接适用的工艺方法及所用焊接材料的进展

传统焊接方法	高效、高质量焊接方法	所用焊接材料的进展
1）氧－乙炔气焊 2）药皮焊条电弧焊 3）埋弧焊 4）气体保护电弧焊 5）等离子弧焊 6）电渣焊 7）电阻焊 8）摩擦焊 9）热剂焊 10）钎焊	1）窄间隙埋弧焊 2）“焊丝－烧结焊剂－铁粉－背面衬垫”联合使用的单面焊双面成型法 3）氩弧焊封底－手工电焊条焊接联合使用法 4）氩弧焊封底－埋弧焊接联合使用法 5）十二至二十个焊头同时焊接的高效率气体保护电弧焊 6）旋转电弧加热－加压焊	1）手工电焊条 ①交直流两用焊条 ②高熔敷效率焊条（高效铁粉焊条、重力焊条） ③超低氢、耐吸潮、高韧性焊条 ④专用焊条（力向下焊条、打底焊条、盖面焊条、管子专用焊条） ⑤低氟、低尘焊条 2）埋弧焊焊剂 ①烧结焊剂 ②高速焊剂 3）气体保护焊焊丝 ①CO_2 气保护实心焊丝 ②气保护焊用新钢号实心焊丝 ③药芯焊丝 4）焊接用辅助材料 ①单面焊双面成型埋弧焊背面衬垫 ②富氩气体保护焊的 Ar－CO_2 混合气体 ③高质量焊条所需高模数水玻璃，焊接用铁粉

表 4.1-26　碳钢电焊条用焊芯化学成分（质量分数）（摘自 GB/T 3429—2002）　%

焊丝代号	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	S	P
H04E	≤0.04	0.30～0.60	≤0.10	—	—	—	≤0.010	≤0.015
H08A	≤0.10	0.35～0.60	≤0.03	≤0.20	≤0.30	≤0.20	≤0.030	≤0.030
H08E	≤0.10	0.35～0.60	≤0.03	≤0.20	≤0.30	≤0.20	≤0.020	≤0.020
H08C	≤0.10	0.35～0.60	≤0.03	≤0.10	≤0.10	≤0.10	≤0.015	≤0.015
H08MnA	≤0.10	0.80～1.10	≤0.07	≤0.20	≤0.30	≤0.20	≤0.030	≤0.030
H10MnSiA	0.06～0.15	0.90～1.40	0.45～0.75	—	—	≤0.20	≤0.030	≤0.025
H15A	0.11～0.18	0.35～0.65	≤0.03	≤0.20	≤0.30	≤0.20	≤0.030	≤0.030
H15Mn	0.11～0.18	0.80～1.10	≤0.03	≤0.20	≤0.30	≤0.20	≤0.035	≤0.035



2.1.2　药皮

（1）药皮组分

焊条药皮组成物用量范围及药皮成分组成范围分别见表 4.1-27 和表 4.1-28。

表 4.1-27　焊条药皮组成物用量范围（质量分数）　%

药皮组成物	钛型	钛钙型	钛铁矿型	氧化铁型	纤维素型	低氢型
硅酸盐	20～35	25～40	30～45	35～45	10～15	7～23
碳酸盐	4～12	15～22	0～18	0～3	3～5	25～55
二氧化钛	45～60	30～45	0～12	0～12	5～8	0～5
铁矿石	—	—	—	29～35	—	—
钛铁矿	—	0～25	25～40	—	20～30	—
铁合金	10～12	10～15	13～20	24～30	14～20	15 以上
有机物	0～9	0～3	0～5	0～5	25～35	—
氟化物	—	—	—	—	—	15～30

表 4.1-28　焊条药皮成分组成范围（质量分数）　%

药皮组成物	钛型	钛铁矿型	氧化铁型	低氢型	纤维素型	钛钙型
SiO_2	15～31	23～38	35～40	5～25	20～26	26.5
TiO_2	24～48	10～18	< 1	< 22	11～15	28.1
MnO	5～7	10～19	16～18	2～7	6～8	—
FeO	4～22	7～25	30～35	2～20	2～12	7.3
MgO	5 左右	1～8	< 5	< 5	3～5	—
Al_2O_3	4～6	3～9	< 4	< 12	9～10	—
CaO	< 10	4～8	< 3	8～26	< 2	10.6
CaF_2	—	—	—	10～23	—	—
挥发成分	< 12	2～10	< 2	< 20	2～10	—

（2）药皮临界吸湿值和标准烘干规范

表 4.1-29 列出不同类型的药皮临界吸湿值和标准烘干规范。

表 4.1-29　药皮临界吸湿值和标准烘干规范

药皮类型	临界吸湿量 /%	烘干温度 /℃	烘干时间 /min
钛铁矿型	3	70～100	30～60
钛钙型	2	70～100	30～60
高氧化钛型	3	70～100	30～60
铁粉氧化铁型	2	70～100	30～60
低氢型	0.5	300～350	30～60
超低氢型	0.5	350～400	60
熔炼[①]	0.05	> 150	60
烧结[①]	0.5	200～300	60

① 为埋弧焊用焊剂

2.1.3　焊条

（1）碳钢焊条型号

碳钢焊条型号见表 4.1-30。

表 4.1-30　碳钢焊条型号（摘自 GB/T 5117—1995）

焊条类型		药皮类型	焊接位置	电流种类
E43 系列	E4300	特殊型	平、立、仰、横	交流或直流正、反接
	E4301	钛铁矿型		
	E4303	钛钙型		
	E4310	高纤维素钠型		直流反接
	E4311	高纤维素钾型		交流或直流反接
	E4312	高钛钠型		交流或直流正接
	E4313	高钛钾型		交流或直流正、反接
	E4315	低氢钠型		直流反接
	E4316	低氢钾型		交流或直流反接
	E4320	氧化铁型	平	交流或直流正、反接
			平角焊	交流或直流正接
	E4322		平	交流或直流正接
	E4323	铁粉钛钙型	平、平角焊	交流或直流正、反接
	E4324	铁粉钛型		
	E4327	铁粉氧化铁型	平	交流或直流正、反接
			平角焊	交流或直流正接
	E4328	铁粉低氢型	平、平角焊	交流或直流反接



续表 4.1-30

焊条类型		药皮类型	焊接位置	电流种类
E50 系列	E5001	钛铁矿型	平、立、仰、横	交流或直流正、反接
	E5003	钛钙型		
	E5010	高纤维素钠型		直流反接
	E5011	高纤维素钾型		交流或直流反接
	E5014	铁粉钛型		交流或直流正、反接
	E5015	低氢钠型		直流反接
	E5016	低氢钾型		交流或直流反接
	E5018	铁粉低氢钾型		
	E5018M	铁粉低氢型		直流反接
	E5023	铁粉钛钙型	平、平角焊	交流或直流正、反接
	E5024	铁粉钛型	平、平角焊	交流或直流正、反接
	E5027	铁粉氧化铁型		交流或直流正接
	E5028	铁粉低氢型		交流或直流反接
	E5048		平、仰、横、立向下	

注：1. 焊接位置栏中文字含义：平——平焊、立——立焊、仰——仰焊、横——横焊、平角焊——水平角焊、立向下——向下立焊。

2. 焊接位置栏中立和仰系指适用于立焊和仰焊的直径不大于4.0 mm的E5014、E××15、E××16、E5018和E5018M型焊条及直径不大于5.0 mm的其他型号的焊条。

3. E4322型焊条适宜单道焊。

4. 焊条型号$EX_1X_2X_3X_4$的编制含义：E——焊条；前两位数字X_1X_2——焊条系列，即熔敷金属抗拉强度最小值，共有两种，分别代表熔敷金属抗拉强度最小值为43 kgf/mm^2（420 MPa）和50 kgf/mm^2（490 MPa)；第三位数字X_3——焊条适用位置（0、1：全位置，平、立、仰、横皆可；2：平焊及平角焊；4：立向下焊）；第三和第四位数字组合X_3X_4——焊条药皮类型及电流种类（见本表）。

5. 焊条牌号的另一套编制方法：$JX_1X_2X_3$。J——结构钢焊条，也有直接以汉字“结”代替符号“J”；前两位数字X_1X_2——焊缝抗拉强度的最小值（kgf/mm^2），共9个等级（见表4.1-31)；第三位数字X_3——从0到7，共8个数字，代表焊条药皮类型和焊接电流种类（见表4.1-32)。

表 4.1-31 结构钢焊条型号 X_1X_2 中代表的强度级别

牌号	焊缝金属抗拉强度等级 /MPa	焊缝金属屈服强度等级 /MPa
J42×	420	330
J50×	490	410
J55×	540	440
J60×	590	530
J70×	690	590
J75×	740	640
J80×	780	—
J85×	830	740
J10×	980	—

表 4.1-32 结构钢焊条型号中 X_3 代表的药皮类型和焊接电流种类

牌号	药皮类型	焊接电源种类
××0	不属已规定的类型	不规定
××1	氧化钛型	直流或交流
××2	氧化钛钙型	直流或交流
××3	钛铁矿型	直流或交流
××4	氧化铁型	直流或交流
××5	纤维素型	直流或交流
××6	低氢钾性	直流或交流
××7	低氢钠型	直流

注：牌号后有时还加注其他符号，代表某种意思（“Fe”：药皮中加铁粉，药皮类型称为“铁粉××型”，其名义熔敷效率不小于105%；“CuP”：表示这种焊条有特殊性能，焊接铜磷钢；“X”：表示这种钢有特殊用途、专用于立向下焊）。

(2) 碳钢焊条熔敷金属化学成分及力学性能

表4.1-33列出对碳钢焊条熔敷金属化学成分的要求。

熔敷金属拉伸试验及E4322型焊条焊缝横向拉伸试验结果应符合表4.1-34的规定，焊缝金属夏比V形缺口冲击试验结果应符合表4.1-35规定。

表 4.1-33 碳钢焊条熔敷金属化学成分（质量分数）（摘自 GB/T 5117—1995） %

焊条型号	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	S	P
E4300 E4301 E4303 E4310 E4311 E4312 E4313 E4320 E4322 E4323 E4324 E4327 E5001 E5003 E5010 E5011	不规定							0.035	0.040



续表 4.1-33

焊条型号	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	S	P
E4315 E4316 E4328 E5014 E5023 E5024	—	1.25①	0.90	0.30①	0.20①	0.30①	0.08①	0.035	0.040
E5015 E5016 E5018 E5027	—	1.60②	0.75	0.30②	0.20②	0.30②	0.08②		
E5028 E5048	—	1.60②	0.90						
E5018M	0.12	0.40~1.60	0.80	0.25	0.15	0.35	0.05	0.020	0.030

注：表中的值均为最大值。
① 元素总量不大于1.5%。
② 元素总量不大于1.75%。

表 4.1-34 碳钢焊条熔敷金属强度和伸长率（摘自 GB/T 5117—1995）

焊条型号		抗拉强度 σ_b		屈服强度 δ_s		伸长率 δ_5 /%
		kgf/mm²	MPa	kgf/mm²	MPa	
E43系列	E4300 E4301 E4303 E4310 E4311 E4315 E4316 E4320 E4323 E4327 E4328	(43)	420	(34)	330	22
	E4312 E4313 E4324					17
	E4322			不要求		
E50系列	E5001 E5003 E5010 E5011	(50)	490	(41)	400	20
	E5015 E5016 E5018 E5027 E5028 E5048					22
	E5014 E5023 E5024					17
	E5018M			(37~51)	365~500	24

注：1. 表中的单值均为最小值。
2. E5018M型焊条熔敷金属抗拉强度名义上是490 MPa（50 kgf/mm²），直径为2.5 mm焊条的屈服强度不大于530 MPa（54 kgf/mm²）。
3. E5024－1型焊条的伸长率最低值为22%。

表 4.1-35 碳钢焊条熔敷金属冲击韧性（摘自 GB/T 5117—1995）

焊条型号	夏比V形缺口冲击吸收功/J	试验温度 ℃
	5个试样中3个值的平均值①	
E××10 E××11 E××15 E××16 E××18 E××27 E5048	≥27	-30
E××01 E××28 E5024-1		-20
E4300 E××03 E××23		0
E5015-1 E5016-1 E5018-1		-46
	5个试样的平均值②	
E5018M	67	-30
E4312 E4313 E4320 E4322 E5014 E××24	—	

① 在计算5个试样中3个值的平均值时，5个值中的最大值和最小值应舍去，余下的3个值要有两个值不小于27 J，另一个值不小于20 J。
② 用5个试样的值计算平均值，这5个值中要有4个值不小于67 J，另一个值不小于54 J。

（3）焊条的烘干参数

焊条的烘干参数见表4.1-36。

表 4.1-36 焊条的烘干参数

焊条类型	母材强度级别 σ_s/MPa	烘干温度/℃	保温时间/h
碱性焊条	≥600 440~550 ≤400	450~470 400~420 350~400	2
酸性焊条	300~400	150~250	1~2
熔炼焊剂	300~800	300~450	2

2.2 埋弧焊焊丝和焊剂

2.2.1 焊丝牌号

埋弧焊用碳钢焊丝的牌号及化学成分要求见表 4.1-37。

表 4.1-38 为部分国外埋弧焊丝化学成分焊丝牌号。

2.2.2 埋弧焊焊丝和焊剂的配合

(1) 碳钢埋弧焊用焊剂表示方法

碳钢埋弧焊用焊剂表示方法见表 4.1-39。

表 4.1-37 埋弧焊用碳钢焊丝的牌号及化学成分（质量分数）（摘自 GB/T 5293—1999） %

<table>
<tr><th>焊丝牌号</th><th>C</th><th>Mn</th><th>Si</th><th>Cr</th><th>Ni</th><th>Cu</th><th>S</th><th>P</th></tr>
<tr><td colspan="9">低锰焊丝</td></tr>
<tr><td>H08A</td><td rowspan="3">≤0.10</td><td rowspan="3">0.30～0.60</td><td rowspan="4">≤0.03</td><td rowspan="2">≤0.20</td><td rowspan="2">≤0.30</td><td rowspan="4">≤0.20</td><td>≤0.030</td><td>≤0.030</td></tr>
<tr><td>H08E</td><td>≤0.020</td><td>≤0.020</td></tr>
<tr><td>H08C</td><td>≤0.10</td><td>≤0.10</td><td>≤0.015</td><td>≤0.015</td></tr>
<tr><td>H15A</td><td>0.11～0.18</td><td>0.35～0.65</td><td>≤0.20</td><td>≤0.30</td><td>≤0.030</td><td>≤0.030</td></tr>
<tr><td colspan="9">中锰焊丝</td></tr>
<tr><td>H08MnA</td><td>≤0.10</td><td rowspan="2">0.80～1.10</td><td>≤0.07</td><td rowspan="2">≤0.20</td><td rowspan="2">≤0.30</td><td rowspan="2">≤0.20</td><td>≤0.030</td><td>≤0.030</td></tr>
<tr><td>H15Mn</td><td>0.11～0.18</td><td>≤0.03</td><td>≤0.035</td><td>≤0.035</td></tr>
<tr><td colspan="9">高锰焊丝</td></tr>
<tr><td>H10Mn2</td><td>≤0.12</td><td>1.50～1.90</td><td>≤0.07</td><td rowspan="3">≤0.20</td><td rowspan="3">≤0.30</td><td rowspan="3">≤0.20</td><td rowspan="2">≤0.035</td><td rowspan="2">≤0.035</td></tr>
<tr><td>H08Mn2Si</td><td rowspan="2">≤0.11</td><td>1.70～2.10</td><td rowspan="2">0.65～0.95</td></tr>
<tr><td>H08Mn2SiA</td><td>1.80～2.10</td><td>≤0.030</td><td>≤0.030</td></tr>
</table>

注：1. 如存在其他元素，则这些元素的总量不得超过 0.5%。
2. 当焊丝表面镀铜时，铜含量应不大于 0.35%。
3. 根据供需双方协议，也可生产其他牌号的焊丝。
4. 根据供需双方协议，H08A、H08E、H08C 非沸腾钢允许硅含量不大于 0.10%。
5. H08A、H08E、H08C 焊丝中锰含量按 GB/T 3429 规定。

表 4.1-38 部分国外埋弧焊丝牌号及化学成分（质量分数） %

<table>
<tr><th>焊丝牌号</th><th>C</th><th>Si</th><th>Mn</th><th>≤P</th><th>≤S</th><th>其余</th><th>标准</th></tr>
<tr><td>YSW11</td><td>≤0.1</td><td>≤0.05</td><td>0.2～0.8</td><td>0.03</td><td>0.03</td><td></td><td rowspan="4">JISZ3311－1976</td></tr>
<tr><td>YSW21</td><td>≤0.13</td><td>≤0.05</td><td>0.8～1.3</td><td>0.03</td><td>0.03</td><td></td></tr>
<tr><td>YSW22</td><td>≤0.13</td><td>0.05～0.25</td><td>0.8～1.3</td><td>0.03</td><td>0.03</td><td></td></tr>
<tr><td>YSW23</td><td>≤0.13</td><td>0.25～0.45</td><td>0.8～1.3</td><td>0.03</td><td>0.03</td><td></td></tr>
<tr><td>C_B－08</td><td>≤0.1</td><td>≤0.03</td><td>0.35～0.6</td><td>0.04</td><td>0.04</td><td></td><td rowspan="4">ГОСТ2246－70</td></tr>
<tr><td>C_B－08A</td><td>≤0.1</td><td>≤0.03</td><td>0.35～0.6</td><td>0.03</td><td>0.03</td><td></td></tr>
<tr><td>C_B－08AA</td><td>≤0.1</td><td>≤0.03</td><td>0.35～0.6</td><td>0.02</td><td>0.02</td><td></td></tr>
<tr><td>C_B－08ГA</td><td>≤0.1</td><td>≤0.03</td><td>0.8～1.1</td><td>0.03</td><td>0.025</td><td></td></tr>
<tr><td>EL8</td><td>≤0.1</td><td>≤0.05</td><td>0.30～0.55</td><td>0.03</td><td>0.035</td><td>余 0.5</td><td rowspan="4">AWSA5.17－76</td></tr>
<tr><td>EL8K</td><td>≤0.1</td><td>0.1～0.2</td><td>0.30～0.55</td><td>0.03</td><td>0.035</td><td>余 0.5</td></tr>
<tr><td>EL12</td><td>0.07～0.15</td><td>≤0.05</td><td>0.30～0.55</td><td>0.03</td><td>0.035</td><td>余 0.5</td></tr>
<tr><td>EM12</td><td>0.07～0.15</td><td>≤0.05</td><td>0.85～1.25</td><td>0.03</td><td>0.035</td><td>余 0.5</td></tr>
<tr><td>S1</td><td>0.06～0.12</td><td>≤0.10</td><td>0.4～0.6</td><td>0.03</td><td>0.03</td><td>Al0.03</td><td rowspan="5">DIN8557（1991.8）</td></tr>
<tr><td>S1 Si</td><td>0.06～0.12</td><td>0.1～0.4</td><td>0.3～0.6</td><td>0.03</td><td>0.03</td><td>Al0.03</td></tr>
<tr><td>S2</td><td>0.08～0.14</td><td>0.05～0.15</td><td>0.8～1.2</td><td>0.03</td><td>0.03</td><td>Al0.03</td></tr>
<tr><td>S2 Si</td><td>0.08～0.14</td><td>0.15～0.4</td><td>0.8～1.2</td><td>0.03</td><td>0.03</td><td>Al0.03</td></tr>
<tr><td>S3</td><td>0.08～0.15</td><td>0.05～0.25</td><td>1.3～1.7</td><td>0.03</td><td>0.03</td><td>Al0.03</td></tr>
</table>

表 4.1-39　焊剂型号 $FX_1X_2X_3$ – H× × × 中数字代表的意义（摘自 GB/T 5293—1999）

	X_1				X_2		X_3		
	熔敷金属拉伸试验结果				拉伸试样和冲击试样的状态		熔敷金属冲击试验结果		
	数字	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	伸长率 δ_5 /%	字母	试件的热处理状态	数字	温度 /℃	冲击吸收功 /J
含义	4	415 ~ 550	≥330	≥22	A	焊态	0	0	≥27
							2	– 20	
							3	– 30	
	5	480 ~ 650	≥400		P	焊后热处理	4	– 40	
							5	– 50	
							6	– 60	

注：完整的焊丝 – 焊剂型号用 $FX_1X_2X_3$ – H× × × 表示，其中“F”表示埋弧焊用焊剂，“H× × ×”表示焊丝牌号。

（2）熔炼焊剂牌号编制方法

熔炼焊剂牌号编制方法见表 4.1-40，表 4.1-41 列出目前埋弧焊常用熔炼焊剂的组成成分。

（3）烧结焊剂牌号编制方法

烧结焊剂牌号编制方法见表 4.1-42，表 4.1-43 列出目前常用烧结焊剂的组成成分。

表 4.1-40　熔炼焊剂牌号 $HJX_1X_2X_3$ 编制方法

	X_1			X_2				X_3
		焊剂类型	焊剂中 MnO 平均含量 /%		焊剂类型	焊剂中 SiO_2 和 CaF_2 平均含量/%		表示同一类型焊剂的不同牌号顺序
						SiO_2	CaF_2	
含义	1	无锰	< 2	1	低硅低氟	< 10	< 10	1. 按 0、1、2、...9 次序排列； 2. 同一牌号焊剂生产粗细两种颗粒时，在细颗粒焊剂牌号末尾加“X”字，粗颗粒者不加符号
				2	中硅低氟	10 ~ 30	< 10	
	2	低锰	2 ~ 15	3	高硅低氟	> 30	< 10	
				4	低硅中氟	< 10	10 ~ 30	
				5	中硅中氟	10 ~ 30	10 ~ 30	
	3	中锰	15 ~ 30	6	高硅中氟	> 30	10 ~ 30	
				7	低硅高氟	< 10	> 30	
	4	高锰	> 30	8	中硅高氟	10 ~ 30	> 30	
				9	其他			

注：熔炼焊剂用 $HJX_1X_2X_3$ 表示。

表 4.1-41　目前常用熔炼焊剂

牌号	焊剂类型	组成成分/%	牌号	焊剂类型	组成成分/%
HJ130	无锰高硅低氟	SiO_2 35 ~ 40　CaF_2 4 ~ 7　MgO 14 ~ 19　CaO 10 ~ 18　Al_2O_3 12 ~ 16　TiO_2 7 ~ 11　FeO ~ 2.0　S≤0.05　P≤0.05	HJ230	低锰高硅低氟	MnO 5 ~ 10　SiO_2 40 ~ 46　CaF_2 7 ~ 11　Al_2O_3 10 ~ 17　MgO 10 ~ 14　CaO 8 ~ 14　FeO≤1.5　S≤0.05　P≤0.05
HJ131	无锰高硅低氟	SiO_2 34 ~ 38　CaF_2 2 ~ 5　CaO 48 ~ 55　Al_2O_3 6 ~ 9　R_2O≤3　FeO≤1.0　S≤0.05　P≤0.08	HJ250	低锰中硅中氟	MnO 5 ~ 8　SiO_2 18 ~ 22　CaF_2 23 ~ 30　Al_2O_3 18 ~ 23　MgO 12 ~ 16　CaO 4 ~ 8　R_2O≤3　FeO≤1.5　S≤0.05　P≤0.05
HJ150	无锰中硅中氟	SiO_2 21 ~ 23　CaF_2 25 ~ 33　Al_2O_3 28 ~ 32　MgO 9 ~ 13　CaO 3 ~ 7　S≤0.08　P≤0.08	HJ251	低锰中硅中氟	MnO 7 ~ 10　SiO_2 18 ~ 22　CaF_2 23 ~ 30　Al_2O_3 18 ~ 23　MgO 14 ~ 17　CaO 3 ~ 6　FeO≤1.0　S≤0.08　P≤0.05
HJ151	无锰中硅中氟	SiO_2 24 ~ 30　CaF_2 18 ~ 24　Al_2O_3 22 ~ 30　MgO 13 ~ 20　其他元素总量≤8　CaO≤6　FeO≤1.0　S≤0.07　P≤0.08	HJ252	低锰中硅中氟	MnO 2 ~ 5　SiO_2 18 ~ 22　CaF_2 18 ~ 24　Al_2O_3 22 ~ 28　MgO 17 ~ 23　CaO 2 ~ 7　FeO≤1.0　S≤0.07　P≤0.08
HJ172	无锰低硅高氟	MnO 1 ~ 2　SiO_2 3 ~ 6　CaF_2 45 ~ 55　Al_2O_3 28 ~ 35　CaO 2 ~ 5　ZrO_2 2 ~ 4　NaF 2 ~ 3　R_2O≤3　FeO≤0.8　S≤0.05　P≤0.05	HJ260	低锰高硅中氟	MnO 2 ~ 4　SiO_2 29 ~ 34　CaF_2 20 ~ 25　Al_2O_3 19 ~ 24　MgO 15 ~ 18　CaO 4 ~ 7　FeO≤1.0　S≤0.07　P≤0.07



续表 4.1-41

牌号	焊剂类型	组成成分/%	牌号	焊剂类型	组成成分/%
HJ330	中锰高硅低氟	MnO 22~26　SiO_2 44~48　CaF_2 3~6　MgO 16~20　Al_2O_3≤4　CaO≤3　FeO≤1.5　R_2O≤1　S≤0.06　P≤0.08	HJ430	高锰高硅低氟	MnO 38~47　SiO_2 38~45　CaF_2 5~9　CaO≤6　Al_2O_3≤5　FeO≤1.8　S≤0.06　P≤0.08
HJ350	中锰中硅中氟	MnO 14~19　SiO_2 30~35　CaF_2 14~20　Al_2O_3 13~18　CaO 10~18　FeO≤1.0　S≤0.06　P≤0.07	HJ431	高锰高硅低氟	MnO 34~38　SiO_2 40~44　CaF_2 3~7　MgO 5~8　CaO≤6　Al_2O_3≤4　FeO≤1.8　S≤0.06　P≤0.08
HJ351	中锰中硅中氟	MnO 14~19　SiO_2 30~35　CaF_2 14~20　Al_2O_3 13~18　CaO 10~18　TiO_2 2~4　FeO≤1.0　S≤0.04　P≤0.05	HJ433	高锰高硅低氟	MnO 44~47　SiO_2 42~45　CaF_2 2~4　CaO≤4　Al_2O_3≤3　FeO≤1.8　R_2O≤0.5　S≤0.06　P≤0.08
HJ360	中锰高硅中氟	MnO 20~26　SiO_2 33~37　CaF_2 10~19　Al_2O_3 11~15　MgO 5~9　CaO 4~7　FeO≤1.0　S≤0.10　P≤0.10	HJ434	高锰高硅低氟	MnO 35~40　SiO_2 40~45　CaF_2 4~8　CaO 3~9　TiO_2 1~8　Al_2O_3≤6　MgO≤5　FeO≤1.5　S≤0.05　P≤0.05

表 4.1-42　烧结焊剂牌号 $SJX_1X_2X_3$ 编制方法

	X_1			X_2X_3
含义		熔渣渣系类型	主要组分范围	表示同一渣系类型焊剂的不同牌号顺序
	1	氟碱型	CaF_2≥15%　$CaO+MgO+MnO+CaF_2$>50%　SiO_2≤20%	按01、02、…09次序排列
	2	高铝型	Al_2O_3≥20%　$Al_2O_3+CaO+MgO$>45%	
	3	硅钙型	$CaO+MgO+SiO_2$>60%	
	4	硅锰型	$MnO+SiO_2$>50%	
	5	铝钛型	$Al_2O_3+TiO_2$>45%	
	6	其他型		

注：烧结焊剂用 $SJX_1X_2X_3$ 表示。

表 4.1-43　目前常用烧结焊剂

牌号	焊剂类型	组成成分/%
SJ101	氟碱型	SiO_2+TiO_2 25　CaO+MgO 30　Al_2O_3+MnO 25　CaF_2 20
SJ301	硅钙型	SiO_2+TiO_2 40　CaO+MgO 25　Al_2O_3+MnO 25　CaF_2 10
SJ401	硅锰型	SiO_2+TiO_2 45　CaO+MgO 10　Al_2O_3+MnO 40
SJ501	铝钛型	SiO_2+TiO_2 30　Al_2O_3+MnO 55　CaF_2 5
SJ502	铝钛型	MnO+Al_2O_3 30　TiO_2+SiO_2 45　CaO+MgO 10　CaF_2 5

注：均为埋弧焊用。

2.3　CO_2 气保护焊用焊丝

2.3.1　实心焊丝

表 4.1-44 和表 4.1-45 分别列出国内外气体保护焊用碳钢实心焊丝的化学成分。其熔敷金属的力学性能见表 4.1-46。

表 4.1-44　CO_2 气体保护焊用碳钢焊丝化学成分（质量分数）（摘自 GB/T 8110—1995）　%

焊丝型号	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Al	Cu②	其他元素总量
ER 49-1	≤0.11	1.80~2.10	0.65~0.95	≤0.030	≤0.030	≤0.30	≤0.20	—	≤0.50	—
ER 50-2③	≤0.07	0.90~1.40	0.40~0.70	≤0.025	≤0.035	—	—	0.05~0.15		≤0.50
ER 50-3	0.06~0.15		0.45~0.75					—		
ER 50-4	0.07~0.15	1.00~1.50	0.65~0.85							
ER 50-5	0.07~0.19	0.90~1.40	0.30~0.60					0.50~0.90		
ER 50-6	0.06~0.15	1.40~1.85	0.80~1.15					—		
ER 50-7	0.07~0.15	1.50~2.00	0.50~0.80							

① 含 Ti：0.05%~0.15%；Zr：0.02%~0.12%。

② 焊丝中铜含量包括镀铜层。



表 4.1-45 几种国外气体保护焊焊丝化学成分（质量分数） %

焊丝牌号	C	Si	Mn	≤P	≤S	其余	标准
YGW11	0.15	0.55 ~ 1.1	1.4 ~ 1.9	0.03	0.03	Ti + Zr0.3 Al0.3	JIS - Z3312 - 1983
YGW12	0.15	0.55 ~ 1.1	1.25 ~ 1.9	0.03	0.03	Ti + Zr0.3 Al0.3	
YGW13	0.15	0.55 ~ 1.1	1.35 ~ 1.9	0.03	0.03	Ti + Zr0.3	
YGW15	0.15	0.4 ~ 1.0	1.0 ~ 1.6	0.03	0.03	Ti + Zr0.3 Al0.1	
YGW16	0.15	0.4 ~ 1.0	0.85 ~ 1.6	0.03	0.03		
ER70S-2	0.07	0.4 ~ 0.7	0.9 ~ 1.4	0.025	0.035		AWSA5.18—79
ER70S-3	0.06 ~ 0.15	0.45 ~ 0.7	0.9 ~ 1.4	0.025	0.035		
ER70S-4	0.07 ~ 0.19	0.65 ~ 0.85	1.0 ~ 1.5	0.025	0.035		
ER70S-5	0.07 ~ 0.19	0.3 ~ 0.6	0.9 ~ 1.4	0.025	0.035		
ER70S-6	0.07 ~ 0.15	0.8 ~ 1.15	1.4 ~ 1.85	0.025	0.035		
ER70S-7	0.07 ~ 0.15	0.5 ~ 0.8	1.5 ~ 2.0	0.025	0.035		
ER70S-G				0.025	0.035		
C_B - 08ГС	0.1	0.6 ~ 0.85	1.4 ~ 1.7	0.03	0.025	Cr0.2Ni0.3	ГОСТ2246—70
C_B - 10ГС	0.14	0.6 ~ 0.9	0.8 ~ 1.1	0.03	0.025	Cr0.2Ni0.3	
C_B - 08$Г_2$С	0.05 ~ 0.11	0.7 ~ 0.95	1.8 ~ 2.1	0.03	0.025	Cr0.2Ni0.3	
SG_1	0.07 ~ 0.12	0.5 ~ 0.7	1.0 ~ 1.3	0.025	0.025		DIN8559TH976
SG_2	0.07 ~ 0.14	0.7 ~ 1.0	1.3 ~ 1.6	0.025	0.025		
SG_3	0.07 ~ 0.14	0.8 ~ 1.2	1.6 ~ 1.9	0.025	0.025		

表 4.1-46 CO_2 气体保护焊用碳钢焊丝熔敷金属力学性能（摘自 GB/T 8110—1995）

焊丝型号	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 $\delta_{0.5}$/%	V 形缺口冲击试验结果	
				试验温度 /℃	冲击吸收功 /J
ER 49-1	≥372	≥490	≥20	室温	≥47
ER 50-2	≥420	≥500	≥22	- 29	≥27
ER 50-3				- 18	
ER 50-4				不要求	
ER 50-5					
ER 50-6				- 29	≥27
ER 50-7					

2.3.2 药芯焊丝

GB10045—2001《碳钢药芯焊丝》规定，焊丝型号的表示方法为 $EX_1X_2X_3T - X_4ML$，字母“E”表示焊丝，字母“T”表示药芯焊丝。

字母“E”后面的前 2 个符号“X_1X_2”表示熔敷金属的力学性能（表 4.1-47）。

字母“E”后面的第 3 个符号“X_3”表示推荐的焊接位置，“0”表示用于平焊和横焊，“1”表示用于全位置焊。

短划后面的符号“X_4”表示焊丝的类别特点（见表 4.1-49）。

字母“M”表示保护气体为 75% ~ 80% Ar + CO_2。当无字母“M”时，表示保护气体为 CO_2 或为自保护类型。

字母“L”表示焊丝熔敷金属的冲击性能在 - 40℃时，其 V 形缺口冲击功不小于 27 J。当无字母“L”时，表示焊丝熔敷金属的冲击性能符合一般要求（见表 4.1-47）。

焊丝熔敷金属的化学成分应符合表 4.1-50 规定。

结构钢用药芯焊丝牌号见表 4.1-51。

表 4.1-47 药芯焊丝熔敷金属力学性能要求[1]（摘自 GB/T 10045—2001）

焊 丝 型 号	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ_5 /%	V 形缺口冲击功	
				试验温度/℃	冲击功 /J
E50 × T - 1，E50 × T - 1M[2]	480	400	22	- 20	27
E50 × T - 2，E50 × T - 2M[3]	480	—	—	—	—
E50 × T - 3[3]	480	—	—	—	—
E50 × T - 4	480	400	22	—	—
E50 × T - 5，E50 × T - 5M[2]	480	400	22	- 30	27
E50 × T - 6[2]	480	400	22	- 30	27
E50 × T - 7	480	400	22	—	—
E50 × T - 8[2]	480	400	22	- 30	27
E50 × T - 9，E50 × T - 9M[2]	480	400	22	- 30	27
E50 × T - 10[3]	480	—	—	—	—
E50 × T - 11	480	400	20	—	—
E50 × T - 12，E50 × T - 12M[2]	480 ~ 620	400	22	- 30	27
E43 × T - 13[3]	415	—	—	—	—
E50 × T - 13[3]	480	—	—	—	—
E50 × T - 14[3]	480	—	—	—	—
E43 × T - G	415	330	22	—	—

续表 4.1-47

焊丝型号	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ_5 /%	V形缺口冲击功	
				试验温度/℃	冲击功/J
E50×T-G	480	400	22	—	—
E43×T-GS③	415	—	—	—	—
E50×T-GS③	480	—	—	—	—

① 表中所列单值均为最小值。
② 型号带有字母"L"的焊丝，其熔敷金属冲击性能应满足表4.1-48的要求。
③ 这些型号主要用于单道焊接而不用于多道焊接。因为只规定了抗拉强度，所以只要求做横向拉伸和纵向辊筒弯曲（缠绕式导向弯曲）试验。

表 4.1-48 型号带有字母"L"的药芯焊丝熔敷金属应满足的冲击性能要求（摘自 GB/T 10045—2001）

型号	V形缺口冲击性能要求
E50×T-1L、E50×T-1ML	-40℃，≥27 J
E50×T-5L、E50×T-5ML	
E50×T-6L	
E50×T-8L	
E50×T-9L、E50×T-9ML	
E50×T-12L、E50×T-12ML	

表 4.1-49 药芯焊丝焊接位置、保护类型、极性和适应性要求（摘自 GB/T 10045—2001）

型号	焊接位置①	外加保护气②	极性③	适用性④
E500T-1	H、F	CO_2	DCEP	M
E500T-1M	H、F	75%～80% Ar + CO_2	DCEP	M
E501T-1	H、F、VU、OH	CO_2	DCEP	M
E501T-1M	H、F、VU、OH	75%～80% Ar + CO_2	DCEP	M
E500T-2	H、F	CO_2	DCEP	S
E500T-2M	H、F	75%～80% Ar + CO_2	DCEP	S
E501T-2	H、F、VU、OH	CO_2	DCEP	S
E501T-2M	H、F、VU、OH	75%～80% Ar + CO_2	DCEP	S
E500T-3	H、F	无	DCEP	S
E500T-4	H、F	无	DCEP	M
E500T-5	H、F	CO_2	DCEP	M
E500T-5M	H、F	75%～80% Ar + CO_2	DCEP	M
E501T-5	H、F、VU、OH	CO_2	DCEP 或 DCEN⑤	M
E501T-5M	H、F、VU、OH	75%～80% Ar + CO_2	DCEP 或 DCEN⑤	M
E500T-6	H、F	无	DCEP	M
E500T-7	H、F	无	DCEN	M
E501T-7	H、F、VU、OH	无	DCEN	M
E500T-8	H、F	无	DCEN	M
E501T-8	H、F、VU、OH	无	DCEN	M
E500T-9	H、F	CO_2	DCEP	M
E500T-9M	H、F	75%～80% Ar + CO_2	DCEP	M
E501T-9	H、F、VU、OH	CO_2	DCEP	M
E501T-9M	H、F、VU、OH	75%～80% Ar + CO_2	DCEP	M
E500T-10	H、F	无	DCEN	S
E500T-11	H、F	无	DCEN	M
E501T-11	H、F、VU、OH	无	DCEN	M
E500T-12	H、F	CO_2	DCEP	M
E500T-12M	H、F	75%～80% Ar + CO_2	DCEP	M
E501T-12	H、F、VU、OH	CO_2	DCEP	M
E501T-12M	H、F、VU、OH	75%～80% Ar + CO_2	DCEP	M
E431T-13	H、F、VD、OH	无	DCEN	S
E501T-13	H、F、VD、OH	无	DCEN	S
E501T-14	H、F、VD、OH	无	DCEN	S
E××0T-G	H、F	—	—	M
E××1T-G	H、F、VD 或 VU、OH	—	—	M
E××0T-GS	H、F	—	—	S
E××1T-GS	H、F、VD 或 VU、OH	—	—	S

① H 为横焊，F 为平焊，OH 为仰焊，VD 为立向下焊，VU 为立向上焊。
② 对于使用外加保护气的焊丝（E×××T-1、E×××T-1M、E×××T-2、E×××T-2M、E×××T-5、E×××T-5M、E×××T-9、E×××T-9M、E×××T-12、E×××T-12M），其金属的性能随保护气类型不同而变化。用户在未向焊丝制造商咨询前不应使用其他保护气。
③ DCEP 为直流电源，焊丝接正极；DCEN 为直流电源，焊丝接负极。
④ M 为单道和多道焊，S 为单道焊。
⑤ E501T-5 和 E501T-5M 型焊丝可在 DCEN 极性下使用以改善不适当位置的焊接性，推荐的极性请咨询制造商。



表 4.1-50　药芯焊丝熔敷金属的化学成分（质量分数）[①②]（摘自 GB/T 10045—2001）　　%

焊丝类型	C	Mn	Si	S	P	Cr[③]	Ni[③]	Mo[③]	V[③]	Al[③④]	Cu[③]
E50×T-1 E50×T-1M E50×T-5 E50×T-5M E50×T-9 E50×T-9M	0.18	1.75	0.90	0.03	0.03	0.20	0.50	0.30	0.08	—	0.35
E50×T-4 E50×T-6 E50×T-7 E50×T-8 E50×T-11	—[⑤]	1.75	0.60	0.03	0.03	0.20	0.50	0.30	0.08	1.8	0.35
E×××T-G[⑥]	—[⑤]	1.75	0.90	0.03	0.03	0.20	0.50	0.30	0.08	1.8	0.35
E50×T-12 E50×T-12M	0.15	1.60	0.90	0.03	0.03	0.20	0.50	0.30	0.08	—	0.35
E50×T-2 E50×T-2M E50×T-3 E50×T-10 E43×T-13 E50×T-13 E50×T-14 E×××T-GS	无规定										

① 应分析表中列出值的特定元素。
② 单值均为最大值。
③ 这些元素如果是有意添加的，应进行分析并报出数值。
④ 只适用于自保护焊丝。
⑤ 该值不做规定，但应分析其数值并出示报告。
⑥ 该类焊丝添加的所有元素总和不应超过 5%。

表 4.1-51　结构钢用药芯焊丝牌号

焊丝牌号	焊缝金属化学成分/%						焊缝金属力学性能≥					
	C	Mn	Si	Al	S	P	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 σ_s/MPa	伸长率 δ_5/%	冷弯角度 /(°)	冲击试验 温度 /℃	冲击试验 夏比 V 形缺口冲击吸收功/J
YJ502-1	≈0.10	≈1.2	≈0.5		≤0.04	≤0.05	490	410	18	120	0	27
YJ506-2	≈0.13	≈0.92	≈0.32	≈0.10	≈0.01	≈0.02	490	410	22		0	27
YJ506-3	≈0.10	≈1.2	≈0.5		≤0.04	≤0.04	490	410	20		-20	47
YJ506-4											-30	28

注：1. 结构钢用药芯焊丝中包裹药芯用的薄钢带均为 H08A 钢。
2. 焊丝牌号编制方法为 $YJX_1X_2X_3-X_4$。其中，Y—药芯焊丝；J—结构钢用；X_1X_2—焊缝金属抗拉强度等级（见表 4.1-31）；X_3—焊丝药芯类型及焊接电流种类（见表 4.1-32）；X_4—焊接时保护方法（1—气体保护；2—自保护；3—气体保护自保护两用；4—其他保护形式）。

2.4　其他辅料

表 4.1-52～表 4.1-54 分别列出日本焊接用液体 CO_2 技术要求、CO_2 气体流量的选择及 CO_2 气体流量和喷嘴高度的关系。

表 4.1-52　日本焊接用 CO_2 气体标准（摘自 JIS K1106—1978）

指标名称	Ⅰ类	Ⅱ类		
		一级	二级	三级
CO_2 含量/%	≥99.8	≥99.5	≥99.0	≥99.0
H_2O 含量/%	≤0.005	≤0.05	≤0.10	—

表 4.1-53　CO_2 气体流量的选择

焊接方法	细丝 CO_2 焊	粗丝 CO_2 焊	粗丝大电流 CO_2 焊
CO_2 气体流量/$L\cdot min^{-1}$	5～15	15～25	25～50

表 4.1-54　CO_2 气体流量和喷嘴高度的关系

焊丝直径/mm	焊接电流/A	喷嘴高度/mm	CO_2 气体流量/$L\cdot min^{-1}$
1.2	100	10～15	15～20
	200	15	20
	300	20～25	20
1.6	300	20	20
	350	20	20
	400	20～25	20～25



3　碳钢的焊接性

影响碳钢焊接性的因素列于表 4.1-55 中。

表 4.1-55　影响碳钢焊接性的因素

影响因素	影　响
碳含量	随着碳含量增加，焊接性逐渐变差
Mn、Si 含量	①含量增加，焊接性变差，但不及碳作用强烈 ②碳当量 $C_{eq}=C+\frac{Mn}{6}+\frac{Si}{24}$ ③C_{eq} 增加，产生冷裂纹的可能性增加，焊接性变差；当 $C_{eq}>0.4$ 时，冷裂纹的敏感性增大
焊接接头的冷却速度	①与 C、Mn、Si 三种元素共同影响热影响区和焊缝的组织，通过组织决定焊接性的好坏 ②从 CCT 图，可获得不同碳钢、不同冷却速度下的组织及其百分比 ③马氏体对焊接性的影响最大，可用材料的硬度表征：马氏体越多，则硬度越高，焊接性也越差 ④影响冷却速度的因素：钢材厚度和接头的几何形状；焊接时母材的原始温度；焊接线能量的大小
氢	使用低氢或超低氢焊接材料，并按规定的规范烘焙，可以大大减少氢致冷裂纹敏感性
拘束度	焊接时母材夹得太紧或结构刚性过大，或板材较厚，都能造成大的拘束，使氢致裂纹敏感性增加
杂质	S、P：过多，则可能在晶界上形成低熔点化合物，引起焊缝熔合线附近的液化裂纹，甚至焊接热裂纹　此外，高 S 含量还可能引起气孔 O：高，焊接性变差，可能引起层状撕裂，含量限制见表 4.1-56 N：高，焊接性变差，含量限制见表 4.1-57
残余合金元素的含量（限制）	Cr、Ni、Cu、As 等必须限制

表 4.1-56　钢材和焊接材料熔敷金属含氧量（质量分数）　%

材　料　类　别	含氧量
平炉沸腾钢	0.010～0.020
平炉镇静钢	0.003～0.010
顶吹转炉镇静钢	0.003～0.005
H08 焊丝	0.010～0.020
裸焊丝在空气中焊接的熔敷金属	0.15～0.30
氧化铁型焊条熔敷金属	0.10～0.13
纤维素型焊条熔敷金属	0.06～0.10
钛钙型焊条熔敷金属	0.05～0.07
低氢型焊条熔敷金属	0.020～0.040
酸性焊剂埋弧焊熔敷金属	0.050～0.10
碱性焊剂埋弧焊熔敷金属	0.020～0.040
CO_2 气体保护焊熔敷金属	0.020～0.070
电渣焊	0.01～0.02

表 4.1-57　钢材和焊接材料熔敷金属含氮量（质量分数）　%

材　料　类　别	含氮量
电炉钢	0.001 左右
平炉钢	0.005 左右
顶吹转炉钢	0.004～0.005
H08 焊丝	0.002～0.003
裸焊丝在空气中焊接的熔敷金属	0.10～0.20
药皮焊条熔敷金属	0.01～0.02
埋弧焊熔敷金属	0.002～0.007
CO_2 气体保护焊熔敷金属	0.006～0.010
自保护药芯焊丝焊熔敷金属	0.015～0.040

4　碳钢的焊接工艺

4.1　低碳钢

4.1.1　焊接性及工艺要点

（1）焊接性

低碳钢具有良好的焊接性（见表 4.1-58）。

表 4.1-58　低碳钢的焊接性

项　目	内　容
焊接性	好，低碳钢的含碳量低，含其他合金元素较少，几乎适于用各种焊接方法进行焊接，一般不需采用特殊工艺措施即可得到优质的焊接接头
等强	选用填充金属时应考虑母材金属的稀释，保证接头与母材等强度
热裂纹倾向	当母材含碳量偏高，或母材、焊接材料成分（如 S、P）不合格时，焊接时有可能产生热裂纹，应调整焊缝成型系数或采用碱性低氢焊条加以防止
预热及后热	一般不需要预热，但如板厚及构件刚度较大或焊接环境温度较低，仍需考虑预热。例如焊接母材板厚大于 30 mm，焊接温度低于 -10℃，需要预热 100～150℃，如试验时发现焊道下裂纹，还应采用后热处理去除接头中的氢
回火或调质状态供货时	应采用碱性低氢焊接材料或低氢焊接工艺焊接这类钢，以使焊缝和热影响区的韧性大致与母材相同，焊接线能量不要太大，预热与层间温度不应过高，以免晶粒过于粗大影响韧性。有时还用后热处理来恢复塑性和冲击韧性

（2）焊接工艺特点

低碳钢的焊接工艺特点包括焊前清理（见表 4.1-59），特别是低温下焊接要采取一定的措施（见表 4.1-60），并进行正确的焊前预热（见表 4.1-61、表 4.1-62）。

表 4.1-59　低碳钢焊前清理要求

采用焊条性质	焊　前　清　理
碱性	必须将工件坡口及两侧 20 mm 范围内的锈、水、油污、油漆等清理干净
酸性	1. 原则上也应进行上述清洗； 2. 由于酸性焊条焊接时具有较强的氧化气氛，对锈的敏感性较差，因此对于焊缝质量要求不高、工件表面锈较少的工件，可以不进行除锈



表 4.1-60　低碳钢低温下的焊接工艺措施

特　点	措　施
1）焊接接头冷却速度快，裂纹倾向增大 2）大厚度、大刚度结构裂纹倾向更严重 3）多层焊接的第一焊道开裂倾向比其他焊道大	1）焊前预热（见表 4.1-61），焊时保持层间温度 2）采用低氢或超低氢焊接材料 3）点固焊时加大电流，减慢焊速，适当增大点固焊缝截面和长度，必要时施加预热 4）整条焊缝连续焊完，尽量避免中断 5）不在坡口以外的母材上打弧，熄弧时弧坑要填满 6）弯板、矫正和装配时，尽可能不在低温下进行 7）尽可能改善严寒下的劳动生产条件

表 4.1-61　低碳钢低温焊接时的预热温度

结　构	板(管壁)厚/mm	各种气温下的预热温度	
梁、柱、桁架结构	≤30	≥ -30℃，不预热 < -30℃，预热 100 ~ 150℃	
	31 ~ 50	≥ -10℃，不预热 < -10℃，预热 100 ~ 150℃	
	51 ~ 70	≥0℃，不预热 <0℃，预热 100 ~ 150℃	
管道、容器结构	≤16	≥ -30℃，不预热 < -30℃，预热 100 ~ 150℃	
	17 ~ 30	≥ -20℃，不预热 < -20℃，预热 100 ~ 150℃	
	31 ~ 40	≥ -10℃，不预热 < -10℃，预热 100 ~ 150℃	
	41 ~ 50	≥0℃，不预热 <0℃，预热 100 ~ 150℃	
安装、检修发电厂管道		C≤0.2%	C：0.21% ~ 0.28%
	≤16	-20℃，可不预热	-10℃，可不预热
	> 16	-20℃，预热 100 ~ 200℃	-10℃，预热 100 ~ 200℃

表 4.1-62　大厚板或大刚度结构焊前预热

钢　号		Q235、Q255、Q275	25、30	08、10、15、20
预热温度	厚板结构	> 150℃	> 150℃	一般不预热
	薄板结构	一般不预热	一般不预热	

4.1.2　焊接材料的选用

低碳钢手工焊焊条、埋弧焊焊丝和焊剂见表 4.1-63；低碳钢 CO_2 气体保护焊用焊丝见表 4.1-64。

表 4.1-63　低碳钢手工焊焊条、埋弧焊焊丝和焊剂

钢　号	手工电弧焊焊条选用			埋弧焊焊接材料选用	
	焊条选用①		施焊条件	焊丝	焊剂④
	一般结构	特殊结构②			
Q235（A3） Q255（A4）	E4313，E4303，E4301，E4320，E4311	E4316，E4315（E5016，E5015）③	一般不预热	H08A	HJ430，HJ431
Q275（A5）	E4316，E4315	E5016，E5015	厚板结构预热 150℃以上	H08MnA	
08、10、15、20	E4303，E4301，E4320，E4311	E4316，E4315（E5016，E5015）	一般不预热	H08A H08MnA	HJ430，HJ431，HJ330
25、30	E4316，E4315	E5016，E5015	厚板结构预热 150℃以上	H08MnA H10Mn2	
20g、22g	E4303，E4301	E4316，E4315（E5016，E5015）	一般不预热	H08MnA H08MnSi H10Mn2	
20R	E4303，E4301	E4316，E4315（E5016，E5015）	一般不预热	H08MnA	

① 大多使用 E43××系列的焊条。
② 焊接动载荷、复杂和厚板结构，重要受压容器，低温下焊接。
③ 表中括号内表示可以代用。
④ HJ430，HJ431，HJ433，焊前需 250℃烘焙 2 h，HJ434 则需 300℃烘焙 2 h。烘干后焊剂含水量都不得超过 0.1%；焊接处必须清除铁锈、油污、水分等杂质，以防产生气孔。烧结焊剂也日益应用广泛。有的烧结焊剂附加上铁粉，可以在衬垫上单面焊双面成形，焊缝美观，效率极高。

表 4.1-64　低碳钢 CO_2 气保护焊用焊丝

焊丝牌号	焊丝性能或用途
H08MnSi、H08MnSiA、H10MnSi	适用于一般低碳钢的焊接
H08Mn2SiA	具有良好的工艺性能和较高的力学性能
H04Mn2SiTiA、H04MnSiAlTiA	适用于对焊接质量要求较高的焊件
YJ502、YJ507、YZ-J502、YZ-J506、YZ-J507	熔敷效率高，对焊接电源无特殊要求，调整合金成分方便，焊缝金属性能比较好，适用于中厚钢板平、横焊的半自动和自动焊

4.1.3　低碳钢的焊接工艺方法

(1) 手工电弧焊

低碳钢手工电弧焊时焊接电流的选择与焊条直径相关（见表 4.1-65）。不同空间位置所选用的坡口形式及其焊接工艺参数见表 4.1-66。表 4.1-67 列出低碳钢焊后热处理工艺。该工艺常见缺陷、产生的主要原因及防止措施见表 4.1-68。

表 4.1-65　焊条直径与焊接电流的关系

参数	选择原则				
焊条直径	焊件厚度/mm	<4	4~8	8~12	>12
	焊条直径/mm	≤板厚	3~4	4~5	5~6
焊接电流	平焊焊接电流可按式 $I=Kd$ 计算，立焊、仰焊、横焊的焊接电流应比平焊小 10%~20%				
	焊条直径 d/mm	1~2	2~4	4~6	
	经验系数 K	25~30	30~40	40~60	
焊接层数	焊接层数根据焊件厚度制订，原则上每层焊缝的厚度为焊条直径的 0.8~1.2 倍，但一般不大于 4~5 mm				

表 4.1-66　不同空间位置焊接低碳钢采用的坡口形式及其焊接工艺参数

焊缝空间位置	焊缝横截面形状	焊件厚度或焊角尺寸/mm	第一层焊缝		其他各层焊缝		封底焊缝	
			焊条直径/mm	焊接电流/A	焊条直径/mm	焊接电流/A	焊条直径/mm	焊接电流/A
平对接焊缝		2.0	2.0	55~60			2.0	55~60
		2.5~3.5	3.2	90~120			3.2	90~120
		4.0~5.0	3.2	100~130			3.2	100~130
			4.0	160~200			4.0	160~210
			5.0	200~260			5.0	220~250
		5.0~6.0	4.0	160~210			3.2	100~130
							4.0	180~210
		≥6.0	4.0	160~210	4.0	160~210	4.0	180~210
					5.0	220~280	5.0	220~260
		≥12.0	4.0	160~210	4.0	160~210		
					5.0	220~280		
立对接焊缝		2.0	2.0	50~55			2.0	50~55
		2.5~4.0	3.2	80~110			3.2	80~110
		5.0~6.0	3.2	90~120			3.2	90~120
		7.0~10	3.2	90~120	4.0	120~160	3.2	90~120
			4.0	120~160				
		≥11.0	3.2	90~120	4.0	120~160	3.2	90~120
			4.0	120~160	5.0	160~200		
		12~18	3.2	90~120	4.0	120~160		
			4.0	120~160				
		≥19.0	3.2	90~120	4.0	120~160		
			4.0	120~160	5.0	160~200		

续表 4.1-66

焊缝空间位置	焊缝横截面形状	焊件厚度或焊角尺寸 /mm	第一层焊缝		其他各层焊缝		封底焊缝	
			焊条直径 /mm	焊接电流 /A	焊条直径 /mm	焊接电流 /A	焊条直径 /mm	焊接电流 /A
横对接焊缝		2.0	2.0	50 ~ 55			2.0	50 ~ 55
		2.5	3.2	80 ~ 110			3.2	80 ~ 110
		3.0 ~ 4.0	3.2	90 ~ 120			3.2	90 ~ 120
			4.0	120 ~ 160			4.0	120 ~ 160
		5.0 ~ 8.0	3.2	90 ~ 120	3.2	90 ~ 120	3.2	90 ~ 120
					4.0	140 ~ 160	4.0	120 ~ 160
		≥9.0	3.2	90 ~ 120	4.0	140 ~ 160	3.2	90 ~ 120
			4.0	140 ~ 160			4.0	120 ~ 160
		14 ~ 18	3.2	90 ~ 120	4.0	140 ~ 160		
			4.0	140 ~ 160				
		≥19.0	4.0	140 ~ 160	4.0	140 ~ 160		
仰对接焊缝		2.0					2.0	50 ~ 55
		2.5					3.2	80 ~ 110
		3.0 ~ 5.0					3.2	90 ~ 110
							4.0	120 ~ 160
		5.0 ~ 8.0	3.2	90 ~ 120	3.2	90 ~ 120		
					4.0	140 ~ 160		
		≥9.0	3.2	90 ~ 120	4.0	140 ~ 160		
			4.0	140 ~ 160				
		12 ~ 18	3.2	90 ~ 120	4.0	140 ~ 160		
			4.0	140 ~ 160				
		≥19.0	4.0	140 ~ 160	4.0	140 ~ 160		
横角焊缝		2.0	2.0	55 ~ 65				
		3.0	3.2	100 ~ 120				
		4.0	3.2	100 ~ 120				
			4.0	160 ~ 200				
		5.0 ~ 6.0	4.0	160 ~ 200				
			5.0	220 ~ 280				
		≥7.0	4.0	160 ~ 200	5.0	220 ~ 280		
			5.0	220 ~ 280				
			4.0	160 ~ 200	4.0	160 ~ 200	4.0	160 ~ 220
					5.0	220 ~ 280		

续表 4.1-66

焊缝空间位置	焊缝横截面形状	焊件厚度或焊角尺寸 /mm	第一层焊缝		其他各层焊缝		封底焊缝	
			焊条直径 /mm	焊接电流 /A	焊条直径 /mm	焊接电流 /A	焊条直径 /mm	焊接电流 /A
平角焊缝		2.0	2.0	50~60				
		3.0~4.0	3.2	90~120				
		5.0~8.0	3.2	90~120				
			4.0	120~160				
		9.0~12	3.2	90~120	4.0	120~160		
			4.0	120~160				
			3.2	90~120	4.0	120~160	3.2	90~120
			4.0	120~160				
仰角焊缝		2.0	2.0	50~60				
		3.0~4.0	3.2	90~120				
		5.0~6.0	4.0	120~160				
		≥7.0	4.0	120~160	4.0	140~160		
			3.2	90~120	4.0	140~160	3.2	90~120
			4.0	140~160			4.0	140~160

表 4.1-67　低碳钢焊后热处理工艺

钢　号	材料厚度 /mm	焊后回火 /℃
Q235、Q235F、10、15、20	≤50	不需焊后回火
	50~100	600~650
25、20g、22g	≤25	不需焊后回火
	>25	600~650

表 4.1-68　低碳钢手工电弧焊常见缺陷、产生的主要原因及防止措施

缺陷	主　要　原　因	防　止　措　施
咬边	过大的焊接电流；电弧过长；焊条倾斜角度不当；摆动时运条不当	减小焊接电流；电弧不要拉得过长；焊条倾斜角度适当；摆动时坡口边缘运条速度稍慢些，中间运条速度稍快些
未熔合	过小的焊接电流；过高的焊接速度；热量不够；母材坡口表面污物未清洗干净	增大焊接电流；减慢焊接速度；焊条角度及运条速度要适当；清理干净表面污物
焊瘤	熔池温度过高	适当减小焊接电流；缩短电弧长度；摆动时坡口边缘运条速度稍慢些，中间运条速度稍快些
凹坑	焊条收尾时未填满弧坑	焊条在收尾处稍多停留一会；采用断续灭弧焊
未焊透	焊接电流过小或焊接速度较快；坡口角度较小，间隙过小或钝边过大；焊条角度及运条速度不当	选用较大的焊接电流或较慢的焊接速度；选择合适的坡口尺寸；焊条角度及运条速度应适当
夹渣	母材坡口表面及附近污物未清理干净；操作不良	将电弧适当拉长些；将母材上的污物与前道焊缝的熔渣清理干净；适当放慢速度以使熔渣浮出，将其吹走
气孔	母材坡口表面及附近污物未清理干净；焊条未按规定烘干；操作不良	焊件坡口应清理干净；焊条按规定烘干；适当加大焊接电流，降低焊接速度，以使气体浮出；不采用偏心的焊条
裂纹	焊接质量不合格；焊缝中偶然渗入超过一定数量的铜；大刚度的部位焊时，收弧过于突然；焊接应力过大	选用合格的焊条；找出铜的来源并消除；改善收弧操作技术，将弧坑填满后收弧；减小焊接应力

注：碱性焊条不宜采用灭弧焊，以免产生气孔。

(2) 埋弧焊

低碳钢埋弧焊焊接工艺参数的选择见表 4.1-69 ~ 4.1-71。

(3) CO_2 气体保护焊

表 4.1-72 列出低碳钢 CO_2 气体保护焊工艺及参数的选择。

表 4.1-69 焊接电流和相应的电弧电压

焊接电流/A	600 ~ 700	700 ~ 850	850 ~ 1 000	1 000 ~ 1 200
电弧电压/V	36 ~ 38	38 ~ 40	40 ~ 42	42 ~ 44

表 4.1-70 不同直径的焊丝可参考的焊接规范

焊丝规格/mm	焊接电流/A		电弧电压/V	电流种类	焊接速度/m·h⁻¹		道间温度/℃	焊丝伸出长度/mm
1.6	350	±20	30±2	直流或交流	18	±1.5	135 ~ 165	13 ~ 19
2.0	400				20			
2.5	450				21			19 ~ 32
3.2	500				23			22 ~ 35
4.0	550				25			25 ~ 38
5.0	600				26			
6.0	650				27			

表 4.1-71 埋弧焊工件焊前及焊后工艺

处 理 工 艺	工 艺 参 数	备 注
焊前准备	1) 表面清理：坡口及坡口附近 20 ~ 50 mm，焊丝表面；2) 焊件装配；3) 焊剂烘干；4) 焊前预热（基本同手工电弧焊）	
焊后回火	温度：600 ~ 650℃ 保温时间：根据板厚决定，一般 1 ~ 2 min/mm，最短不少于 30 min，最长不超过 3 h	工件较厚或刚性较大，或者重要焊件需要
焊后正火或退火	加热到 920 ~ 940℃，空冷或炉冷	热影响区强度下降，塑性和冲击韧性提高

表 4.1-72 CO_2 气体保护焊工艺及参数的选择

工艺参数	选 择 原 则
焊前清理	1) 对不重要的焊件，可不进行焊前清理 2) 清理要求：可参照手工电弧焊酸性焊条焊前清理要求
焊丝直径	1) 直接影响熔深、焊丝熔化速度及熔滴过渡形式 2) 直径大于 2 mm 的焊丝只能用于细颗粒过渡的焊接 3) 焊接电流相同的情况下，焊丝直径越小，熔深越大，熔化速度越高 4) 细丝用于焊接薄板，被焊板材厚度增加，焊丝直径也应相应增加（见表 4.1-73）
焊丝干伸长度	1) 干伸长度越长，预热作用越强，送丝速度不变时，将降低焊接电流，容易引起未焊透和未熔合等缺陷 2) 干伸长度越短，送丝速度不变时，将提高焊接电流，容易在全位置焊时引起铁水的流失，同时也影响观察电弧，从而影响焊工操作（见表 4.1-74）
焊接电流	1) 影响熔敷速度及熔深，电流增大，两者都要增加 2) 选择电流时必须根据焊丝直径，不同的焊丝直径都有一个合适的电流区间，在此区间，焊接过程才能稳定进行（见表 4.1-75、表 4.1-76）
焊接电压	1) 影响焊接过程的稳定性、焊丝金属熔滴过渡形式、焊缝金属的氧化和飞溅等 2) 电弧电压增加，熔宽明显增加，熔深略有减小，但焊缝金属的氧化和飞溅增加，焊缝的力学性能下降 3) 电压和电流必须适当配合，才能获得良好的工艺性能；由于 CO_2 气体保护焊的电弧静特性是上升特性，所以电弧电压随焊接电流的减小而降低（见表 4.1-76）
CO_2 气体流量	根据焊接电流、焊接速度、焊丝伸出长度、喷嘴直径来选择（见表 4.1-76）
回路电感	根据焊接直径、焊接电流、电弧电压、焊接速度来选择（见表 4.1-77）
焊接速度	半自动焊时焊速一般为 5 ~ 60 m/h，自动焊时一般为 25 ~ 150 m/h

表 4.1-73 各种直径焊丝适用范围

焊丝直径/mm	熔滴过渡形式	板厚/mm	焊缝位置
0.5~0.8	短路过渡 细颗粒过渡	1.0~2.5 2.5~4	全位置 水平
1.0~1.4		2~8 2~12	
1.6	短路过渡	3~12	水平、立、仰、横
≥1.6	细颗粒过渡	>6	水平

表 4.1-74 H08Mn2Si 焊丝直径所允许的干伸长度

焊丝直径/mm	焊丝干伸长度/mm
0.8	6~12
1.0	7~13
1.2	8~15

表 4.1-75 不同焊丝直径的合适焊接电流区间

焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	
	细颗粒过渡（30~45 V）	短路过渡（16~22 V）
0.8	150~250	60~160
1.2	200~300	100~175
1.6	350~500	120~180
2.4	500~750	150~200

表 4.1-76 常用焊丝直径的焊接电流和电弧电压范围及气体流量

焊丝直径 /mm	短路过渡		颗粒过渡		气体流量 /L·min⁻¹
	电流/A	电压/V	电流/A	电压/V	
0.5	30~60	16~18	—	—	5~15
0.6	30~70	17~19	—	—	
0.8	50~100	18~21	—	—	
1.0	70~120	18~22	—	—	
1.2	90~150	19~23	160~400	25~38	
1.6	140~200	20~24	200~500	26~40	15~25
2.0	—	—	200~600	27~40	
2.5	—	—	300~700	28~40	
3.0	—	—	500~800	32~42	

表 4.1-77 不同焊接工艺参数下合适的回路电感

焊丝直径/mm	电流/A	电压/V	电感值/mH
0.8	100	18	0.01~0.08
1.2	130	19	0.01~0.16
1.6	160	20	0.30~0.70

4.2 中碳钢

4.2.1 焊接性及工艺要点

中碳钢的焊接性及工艺要点见表 4.1-78。

表 4.1-78 中碳钢的焊接性及工艺要点

焊接性	焊接工艺要点
1）含碳量为0.30%~0.60% 2）当C接近0.30%而Mn不高时，焊接性良好 3）C增高，焊接性逐渐变差，且气孔敏感性增大 4）脆硬倾向和裂纹敏感倾向较大 5）焊缝热裂纹在弧坑更为敏感，特别是硫杂质控制不严时，更易显示出来	1）焊前预热：预热温度取决于碳当量、结构刚性、母材厚度、焊条类型和工艺方法。通常，35或45钢可为150~250℃，含碳量再高或刚性大，预热温度可在250~400℃ 2）层间温度：与预热一样 3）为减少热裂纹和消除气孔，采用U形坡口，也可用V形坡口，以降低母材熔化比。坡口附近的油、锈应去除干净 4）用小直径焊条，小电流慢速度焊接第一层焊缝以防止出现裂纹，焊条进行400℃，2 h烘干 5）锤击焊缝减少残余应力 6）采用直流反接，焊接电流较低碳钢小10%~15% 7）焊后处理：保温缓冷，对大厚度工件，大刚性结构件和严厉条件下（动载荷或冲击载荷），应立即进行消除应力回火，回火温度一般为600~650℃ 8）后热：便于扩散氢逸出，温度视具体情况而定（比规定预热温度稍高一些），保温时间约每10 mm厚度为1 h左右

4.2.2 焊接材料及工艺的选用

（1）中碳钢焊接材料及工艺的选用原则

中碳钢焊接材料及工艺的选用原则见表 4.1-79。

表 4.1-79 中碳钢焊接材料及工艺的选用原则

	选用原则
一般	1）尽量选用碱性低氢型焊接材料，抗裂性较好，如E5015（结507），E6015-D1（结607）等 2）不要求焊缝等强时，焊条强度可比母材强度等级低一档，如母材为490 MPa级时，焊条可用E4316（结426），E4315-D1（结427），以代替E5016或E5015 3）焊条举例见表4.1-80
个别	对于一些不重要的结构件，也可选用非碱性低氢焊条，可采用钛铁矿型或钛钙型焊条，但工艺措施应严格配合，认真控制预热温度和尽量减少母材熔深
特殊	可选用铬镍奥氏体钢焊条，不需预热，如E0-19-10-16（奥102），E0-19-10-15（奥107），E1-23-13-16（奥302），E1-23-13-15（奥307）或E2-26-21-15（奥407），但应采用小电流，多层焊。由于这类焊条成本高，一般不宜采用
焊接工艺	中碳钢焊接工艺参数可参考低碳钢的焊接工艺参数下限值，焊接速度应稍慢些 表4.1-81为中碳钢预热和消除应力热处理温度



表 4.1-80 中碳钢焊接及补焊用焊条

钢号	母材含碳量 /%	焊接性	母材力学性能≥					选用焊条牌号	
			σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%	ψ /%	A_k /J	不要求强度或不要求等强	要求等强度
35 ZG270-500	0.32~0.40 0.31~0.40	较好 较好	315 270	530 500	20 18	45 25	55 22	E4303 E4301 E4316 E4315	E5016 E5015
45 ZG310-570	0.42~0.50 0.41~0.50	较差 较差	355 310	600 570	16 15	40 21	39 15	E4303 E4301 E4316 E4315 E5016 E5015	E5516-G E5515-G
55 ZG340-640	0.52~0.60 0.51~0.60	较差 较差	380 340	645 640	13 10	35 18	— 10	E4303 E4301 E4316 E4315 E5016 E5015	E6016-D1 E6015-D1

表 4.1-81 中碳钢预热和消除应力热处理温度

钢号	板厚 /mm	预热及层间温度/℃	消除应力回火温度/℃	锤击
25	≤25	>50	600~650	不要
30	25~50	>100		要
		>150		要
35	50~100	>150		要
45	≤100	>200		要

(2) 手工电弧焊中碳钢常见焊接缺陷、产生原因及防止措施

表 4.1-82 列出手工电弧焊中碳钢常见焊接缺陷、产生原因及防止措施。

表 4.1-82 手工电弧焊中碳钢常见焊接缺陷、产生原因及防止措施

常见缺陷	产生原因	防止措施
热裂纹	焊缝含碳量偏高，含硫量偏高，含锰量偏低	减少母材在焊缝中的比例(采用小电流、开 U 形坡口)，采用碱性低氢型焊条，适当预热
冷裂纹	冷却速度太快，焊缝含氢量偏高，较大的应力	减慢近缝区冷却速度，采用碱性低氢型焊条，焊条一定要烘干
热应力裂纹	焊接区刚性过大，多层焊时第一、二道焊缝断面过薄	避免焊接区与焊件整体产生过大的应力差（可先在坡口表面堆焊隔离层防止近缝区冷裂，然后采用“冷焊法”），第一、二道焊接时尽量减慢焊接速度，采用碱性低氢型焊条

4.3 高碳钢

4.3.1 焊接性及工艺要点

高碳钢的焊接性及工艺要点见表 4.1-83。

表 4.1-83 高碳钢的焊接性及工艺要点

焊接性	焊接工艺要点	备注
1）含碳量大于 0.6%，焊接性差 2）脆硬倾向和裂纹敏感倾向大	1）焊前退火：高碳钢一般用于制作高硬度与耐磨的零部件。应在退火条件下焊接这类钢，然后热处理。例如修复断裂的高碳钢零部件前，如条件许可，建议先将修复部位进行退火 2）焊前预热：采用结构钢焊条时，250~350℃预热 3）层间温度：与预热一样 4）焊后处理：工件应保温，并立即送入炉中在 650℃保温，进行消除应力热处理；之后进行相应的热处理以获得相应的性能	1）尽量采用小的焊接电流和小的焊接速度，以减小熔深，减少母材的熔入 2）选择合适的坡口形式，以尽量减少母材金属熔入焊缝中的比例，从而降低焊缝金属的含碳量，提高焊缝金属的韧性，降低产生冷裂纹的倾向 3）焊前应注意烘干焊条 4）可以采用锤击方法，以减小焊接应力 5）气焊时，为了防止过热，应尽量提高焊接速度

4.3.2 焊接材料的选用

高碳钢焊接材料的选用如表 4.1-84 所示。

表 4.1-84 高碳钢焊接材料的选用

焊接方法及焊件性质		焊条牌号
手工电弧焊	要求强度较高	E7015-D2 或 E6015-D1
	要求强度一般	E5016 或 E5015
	不要求预热	E0-19-10-16（奥 102），E0-19-10-15（奥 107），E1-23-13-16（奥 302），E1-23-13-15（奥 307），E2-26-21-16（奥 402）或 E2-26-21-15（奥 407）
气焊	要求强度较高	与母材成分相近的焊丝
	要求强度较低	低碳钢焊丝

注：焊接材料通常不选用高碳钢；所有焊接材料都应当是低氢型的；手工电弧焊焊接时，也可选用与母材强度等级相当的低合金钢焊条或填充金属。

5 碳钢焊接材料牌号对照

5.1 焊条

表 4.1-85 为国内外低碳钢常用焊条牌号对照。



表 4.1-85　国内外低碳钢常用焊条牌号对照

中国			美国	日本	前苏联	英国	瑞典	德国	国际标准化组织
GB	牌号	天泰	AWS	JIS	ГОСТ	BS	ESAB	DIN	ISO
E4300	J420G		E6011	D4311	Э42				
E4313	J421、J421X、J421Fe	R－13 R－13D TR－13	E6013	D4313	Э42	E43 22R15 E51 32R15 E51 22R15 E51 43R22 E51 54RR25	OK50.10 OK43.32 OK46.00 OK50.40 OK46.16	E43 22R3 E51 32R（c）3 E51 22R（c）3 E51 43R3 E51 54RR（B）7 E51 22RR6 E43 32RR6	E43 2R15 E51 3R15 E51 2R15 E51 4R25 E51 5AR25 E43 3RR22
E4324	J421Fe13～25、J421Z		E6024	D4324					
E4303	J422、J422Y、J422GM、J422Fe	F－03 F－43		D4303	Э46 MP－3				
E4323	J422Fe13～25、J422Z、J422CrCu、J422CuCrNi			D4324					
E4301	J423	E－10 EL－10 E－20		D4301	Э42 OMM－5 MЭЗ－04				
E4320	J424		E6020		Э42				
E4327	J424Fe13～25	T－27 T－27L	E6027	D4327	Э42 Э46	E43 54A150 35	OK Femax 39.50 OK Femax 39.95	E43 54AR11140	E43 5A150 35
E4311	J425	TC－11 TC－11A	E6011	D4311	Э42 BCЦ$_2$－4 OMA－2	E43 22C19	OK Pipetrode 22.45 OK Pipetrode 22.65		
E4310	J425G		E6010						
E4316	J426、J426X、J426H、J426DF	TC－46 TL－46D	E6016	D4316	Э42A Э46A BH－48				
E4328	J426Fe13		E6028						
E4315	J427、J427X、J427Ni		E6015						
E5014	J501Fe		E7014		Э50	E43 32RR110 56 E51 32RR140 32	OK46.16	E43 21RR11 120 E43 32RR11 120	E43 2RR120 32 E43 3RR110 56
E5024	J501Fe13～25、J501z	T－24	E7024	D4324	Э50	E51 32R160 35 E51 32R180 31	OK Femax 33.65 OK Femax 33.80	E51 32RR11 160 E51 32RR11 180	E51 3RR160 35 E51 3RR180 31
E5003	J502、J502Fe			D5003	Э50				
	J502Fe13～25		E7023						
E5001	J503		E7001						
E5027	J504Fe、J504Fe14		E7027						
E5011	J505、J505MoD		E7011						
E5016	J506、J506DF、J506GM	TL－50 TLH－50 TL－50U TLF－50 TL－50D TL－508 TLH－508	E7016		Э50A AHO－11 ЦCK－50 CK2－50	E51 54B24(H) E51 43B24(H) E51 43B46(H)	OK48.00 OK48.04 OK48.15	E51 55B10 E51 43B10 E51 53B10 E51 32B（R）10 E43 33B（R）10	E51 5B24（H） E51 4B24（H） E51 4B46（H） E51 3B26（H） E43 3B110 26(H)
	J506X、J506D			D5016					
E5018	J506MA、J506Fe		E7018						
E5016－1	J506H		E7016－1	D5016					
E5018－1	J506Fe－1		E7018－1						
E5028	J506Fe13～25	TL－56 TL－56L	E7028	D5026	Э50A AHO－10	E51 54B160 36（H） E51 54B200 46（H）	OK Femax 38.48 OK Femax 38.65 OK Femax 38.85 OK Femax 38.95	E51 55B（R）12 160 E51 54B（R）12 200	E51 5B160 36（H） E51 5B200 46（H）
E5015	J507、J507H、J507X、J507D、J507DF、J507XG		E7015	D5015					
E5018	J507Fe		E7018						



5.2　焊丝

国内外碳钢用气体保护焊实心焊丝对照见表 4.1-86，碳钢、低合金钢用埋弧焊焊丝对照见表 4.1-87，碳钢用电弧焊药芯焊丝对照见表 4.1-88。

表 4.1-86　国内外碳钢用气保护焊实心焊丝对照

中国		美国	日本	瑞典	德国
GB	天泰	AWS	JIS	ESAB	DIN
ER50－2		ER70S－2	YGT 50		
ER50－3	KM－53	ER70S－3	YGW 16		
ER50－4	KM－54	ER70S－4	YGW 12		
ER50－6	KM－56	ER70S－6	YGW 12 YGT 50	OK Autrode 12.51 OK Autrode 12.64 OK Autrode 12.60	SG2 SG3 WS G2
	KM－58	ER70S－G	YGW 11 YGW 13 YGW 15		

表 4.1-87　国内外碳钢、低合金钢用埋弧焊焊丝对照

中国		美国	瑞典	德国
GB	天泰	AWS	ESAB	DIN
	KW2	EL8		
H08A		EL12	OK Autrod 12.10	S1
		EM12	OK Autrod 12.20	S2
H08MnA	KW3	EM12K	OK Autrod 12.22	S2 Si
H10Mn2	KW1	EM14	OK Autrod 12.40	S4
		EA1	OK Autrod 12.24	S2 Mo
		EA2	OK Autrod 12.34	S4 Mo
		EA3		UP S2 CrMo1
		EB2		S2 Ni2
		ENi2		
		EM2		
	KW6	EG	OK Autrod 13.36	

表 4.1-88　国内外碳钢用电弧焊药芯焊丝对照

中国	美国	日本	瑞典	德国
牌号	AWS	JIS	ESAB	DIN
YJ502－3	E70T－1	YFW 24 YFW 34	OK Tubrod 15.10 OK Tubrod 15.14 OK Tubrod 15.16 OK Tubrod 15.18	SG R1
	E70T－4	YFW 12	OK Tubrod 14.18	
YJ506－4	E70T－5		OK Tubrod 15.00	SG B1

续表 4.1-88

中国	美国	日本	瑞典	德国
牌号	AWS	JIS	ESAB	DIN
	E71T－1	YFW 24 YFW 34		SG R1
	E71T－5	YFW 24 YFW 34	OK Tubrod 14.91	SG B1
	E71T－8	YFW 14		
	E71T－G		OK Tubrod 14.01	

5.3　焊剂

国内外埋弧焊焊剂对照见表 4.1-89。

表 4.1-89　国内外埋弧焊焊剂对照

中国		美国		瑞典
牌号	天泰	焊剂	焊丝	ESAB
		F6A2	EL8	
	KF380	F7A0		
	KF385	F7A2		
		F7A6		
		F7A0	EL12	OK Flux 10.81
		F7A2		OK Flux 10.80
		F7A4		OK Flux 10.70
		F7A6		
SJ501		F6A0	EM12	
		F6A2		
SJ101		F6A4		OK Flux 10.61
		F6A6		
		F6A2	EM12K	OK Flux 10.40
	KF560 KF565	F7A4		
		F7A6		OK Flux 10.71
		F6A2	EH14	
		F7A0		
		F7A2		
		F7A4		
	KF600	F7A6		OK Flux 10.62
		F7A8		

编写：夏志东（北京工业大学）



第2章 铸铁的焊接

铸铁作为工程和结构材料应用十分广泛，几乎遍及国民经济各个部门，尤其在机械制造、交通运输、农业机械中占有举足轻重的地位。但铸铁是比较难焊的材料，直至20世纪60年代，铸铁焊补仍是困扰我国机械工业的“老大难”问题：在机械制造、农业机械中铸铁使用量各占60%～90%、50%～70%，当时有缺陷的铸铁件达30%～50%，重新熔化浪费大量能源和工时。此外，一些工厂的重大关键设备使用中发生损坏，严重影响生产。因此，机械工业部将铸铁焊接作为科研及推广项目列入“四五”计划。项目组从大量铸铁焊接事例调查入手，找到了失败的症结，发现了一些好的经验，对铸铁焊接性特点进行科学分析，产生了新的认识，如认为铸铁等脆性材料焊接时经常发生的一种裂纹主要是由热应力引起的，甚至低碳钢等塑性材料在一定条件下也会发生，故称之为“热应力裂纹”；再如认为“熔合区”概念在焊接冶金上较“半熔化区”更为科学合理；提出了解决铸铁焊接难题的新方案，制订了较全面、系统的焊接工艺方法，如异质焊条“电弧冷焊工艺”、同质焊条“不预热焊工艺”消除白口，“加热减应区法”防止裂纹，编入《焊工手册》，1973年召开全国铸铁焊补经验交流会进行推广。之后项目组完成了一系列难度很大的铸铁焊接项目，如重7.5 t、长7.7 m机床已加工床面长800 mm的裂纹用灰铸铁芯焊条不预热焊成功，无白口，易加工；国家重大设备，唯一的一台16 m立车、总重180 t的卡盘一块重45 t断裂，裂纹总长12 m、裂处厚115 mm，坚持用传统理论方法焊接失败后，项目组采用新的异质焊条电弧冷焊工艺焊接成功；并用电弧冷焊焊接修复了水轮发电机组、内压2.5 MPa（25 kgf/cm^2）环形接力器环向裂纹1 650 mm的破裂；引黄重点工程、10台大型轴流泵4 m长大直径厚壁珠光体球墨铸铁包覆不锈钢铸-焊复合结构的制造等，全部如期高质量完成，至今仍在使用。一机部在1975年全国焊接经验交流会上对铸铁焊补项目（编者等）及低尘少害焊条研究项目进行了表彰。以后五年全国举办了多次铸铁焊补培训班，铸铁焊接新的理论和工艺方法编入了机械工程手册和高校教科书，铸铁焊接成为广泛掌握的技术。60、70年代我国许多焊接工作者对铸铁焊接材料和工艺方法进行了长期的研究并作出了许多贡献。钢芯石墨化灰铸铁焊条是应用很早、很广泛的一种，手工电渣焊在个别重型机床厂有所应用；高钒焊条、铜钢焊条也有所应用；镍基合金焊条仍是应用最广的焊条；铸铁芯灰铸铁焊条的研究及机械化生产对铸铁焊接的推广起了重要作用；低碳钢或纯铁芯弱氧化性铁粉稀释型焊条的性能及应用效果是较好的；细丝CO_2气体保护焊有很好的应用价值，高钒药芯焊丝的研制和应用不仅是成功的，也是先进的，与近年来国外镍铁焊丝自保护、气体保护自动焊的研究相比，在经济、技术上有明显的优点。1964年边云峰研制出钢芯球墨铸铁焊条在国际上是很早的；1975年西安交大等应用稀土镁、硅钙合金将力学性能提高到很高的水平；1982年作者采用碱土金属钡、钙为主及铝、碳、硅强脱氧脱硫、强孕育的途径成功，提高了球化稳定性，降低了白口倾向，生产中实现和广泛采用了不预热焊接，使球墨铸铁的焊接变得容易起来并适于焊接其他铸铁。这一方法的成功及铝、钡、钙、铈等元素联合脱氧脱硫、孕育、球化的途径，甚至成分组合事实上成为以后研究的依据和基础。

1 铸铁

铸铁是$w_C > 2\%$的铁碳合金，通常含有硅，是三元合金。有时加入铬、钼、镍、铜、铝，成为有特殊性能的合金铸铁，而高铬铸铁、高镍奥氏体铸铁则属于高合金铸铁。球墨铸铁及蠕墨铸铁含有微量球化元素、蠕化元素稀土、镁等。由于铸铁中碳的存在形式、石墨形状、基体组织及合金元素不同，其性能有很大差别，形成了不同的种类。

（1）白口铸铁

白口铸铁是铁液凝固过程中未析出石墨、碳与铁或铬等形成碳化物，断口为白亮结晶状。普通白口铸铁性质脆硬，极少单独使用。白口铸铁是制造可锻铸铁的中间品。表层为白口铸铁的冷硬铸铁常用作轧辊。抗磨白口铸铁纳入GB8263—87计10个牌号全为合金铸铁，包括4种高铬铸铁。

（2）灰铸铁

灰铸铁中碳以片状石墨分布于不同基体中，以其断口颜色命名。由于有许多优良性能，应用非常广泛。但片状石墨的尖端效应使灰铸铁伸长率接近于零，按国标GB 9439—1988规定，灰铸铁牌号是按抗拉强度（MPa）最低值分，从HT100至HT350、级差50 MPa共6个牌号。灰铸铁化学成分（质量分数）一般在下述范围内：C2.6%～3.8%，Si1.2%～3.0%，Mn0.4%～1.5%，P≤0.5%，S≤0.12%。

（3）可锻铸铁

可锻铸铁是将白口铸铁长时间高温退火、共晶渗碳体分解形成团絮状石墨，从而力学性能大为提高。GB/T 9440—88按最低σ_b（MPa）和δ（%）从KTH300-06至KTZ700-02规定了8个牌号及KTB350-4至KTB450-7白心可锻铸铁4个牌号。可锻铸铁碳、硅含量较灰铸铁低，硅含量仅为灰铸铁的50%，使白口铸铁中无片状石墨，从而保证高的力学性能。

（4）球墨铸铁

向恰当成分的铁液中加入适量球化剂，石墨呈球状析出，便得到球墨铸铁。我国常用的球化剂是稀土镁。按基体组织可分为铁素体、珠光体及奥-贝球墨铸铁。铁素体球墨铸铁通过低温石墨化退火获得；铸态铁素体球墨铸铁是控制Mn≤0.4%、P≤0.07%、球化元素含量并加强孕育处理获得的。珠光体球墨铸铁通过正火处理获得；铸态珠光体球墨铸铁是靠提高锰、加入铜等珠光体元素获得。奥-贝球墨铸铁通过奥氏体-贝氏体化热处理获得，兼有高强度、高塑性。球墨铸铁化学成分较为严格：C3%～4%、Si2%～3%、S<0.01%～0.04%、P<0.1%，Mg0.03%～0.05%，Re0.03%～0.05%。球墨铸铁的牌号和力学性能见表4.2-1。

表4.2-1 球墨铸铁牌号、力学性能（摘自GB/T 1348—1988）

牌号	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	供参考	
	≥			硬度 HB	基体组织
QT400-18	400	250	18	130～180	铁素体
QT400-15	400	250	15	130～180	铁素体
QT450-10	450	310	10	160～210	铁素体
QT500-7	500	320	7	170～230	铁素体+珠光体



续表 4.2-1

牌号	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	供参考	
	≥			硬度 HBS	基体组织
QT600-3	600	370	3	190～270	珠光体＋铁素体
QT700-2	700	420	2	225～305	珠光体
QT800-2	800	480	2	245～335	珠光体回火组织
QT900-2	900	600	2	280～360	贝氏体或回火马氏体

铁素体球墨铸铁用于制造受压阀门、大直径管道、轴承座、后桥壳、万向节等，珠光体球墨铸铁用于制造曲轴、连杆、活塞、齿轮、轧辊等。

（5）蠕墨铸铁

蠕墨铸铁是介于灰铸铁和球墨铸铁之间的一种铸铁，兼有灰铸铁优良的铸造性能及减震性、切削加工性、导热性，又有较好的力学性能、耐热疲劳性、焊接性。用于制造钢锭模、金属型铸模、内燃机汽缸盖，寿命较灰铸铁长，还可制造重型机床、齿轮箱。蠕墨铸铁的铸造过程与球墨铸铁相似，其难点在于石墨蠕化均匀程度和达到一定蠕化率（≥50%）。稀土镁加入量、残留含量及镁的比例都较低，以便提高蠕化率。蠕化率 $VG=\frac{蠕墨数}{蠕墨数+球墨数}\times100\%$。蠕墨铸铁力学性能见表 4.2-2。

表 4.2-2　蠕墨铸铁的力学性能（摘自 JB 4403—1987）

牌号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度 HBS	蠕化率 VG/%	主要基体组织
	≥				≥	
RuT420	420	335	0.75	200～280	50	珠光体
RuT380	380	300	0.75	193～274	50	珠光体
RuT340	340	270	1.0	170～249	50	珠光体＋铁素体
RuT300	300	240	1.5	140～217	50	铁素体＋珠光体
RuT260	260	195	3	121～197	50	铁素体

2　铸铁的焊接性

2.1　焊接接头分区、成分组织及性能

铸铁焊接接头由焊缝、熔合区、热影响区及母材组成，其中熔合区由半熔化区和未混合区组成，见图 4.2-1。

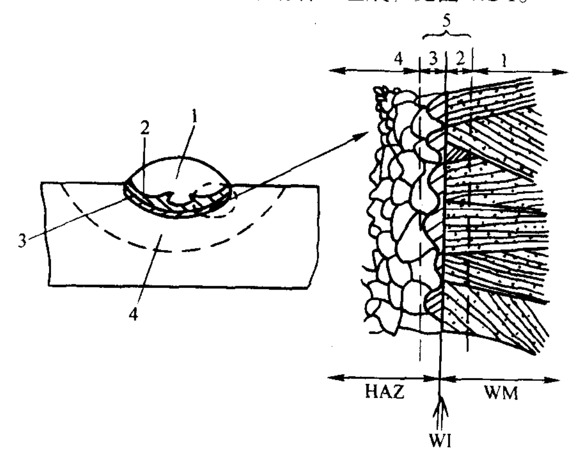


图 4.2-1　焊接接头分区

1—焊缝；2—未混合区；3—半熔化区；4—热影响区；5—熔合区

2.1.1　焊缝

（1）铸铁型焊缝

1）灰铸铁型焊缝　石墨呈片状分布在珠光体或铁素体基体上。如果焊接工艺不当、冷却速度过快或焊缝石墨化能力不足，会产生渗碳体。

2）球墨铸铁型焊缝　石墨呈小球状，较铸造球墨铸铁的球状石墨直径小得多，不同球化元素、不同球化及孕育方式，其石墨球大小相差悬殊。多种强孕育元素联合孕育球化的焊缝石墨球径更小，数量更多，而白口倾向较低。基体可以是铁素体、珠光体或二者混合，与化学成分有关：硅增加铁素体，$w_C>3.6\%$，易得铁素体焊缝；孕育作用强、石墨数量多、易得铁素体；提高锰含量（$w_{Mn}0.6\%\sim0.8\%$），加入铜及镍，焊缝易成为珠光体。$w_{Si}>4.5\%$时焊缝塑性及韧性将显著降低，提高锰加入铜也会降低焊缝塑性、韧性。因此球墨铸铁焊缝必须控制化学成分在合理范围内。如果焊缝球化元素及孕育元素不足，会出现片状石墨，导致力学性能大幅度降低；如果焊接工艺不当，致冷却速度过快，或球化元素种类不当、含量过多，焊缝会产生较多的渗碳体。

3）蠕墨铸铁型焊缝。

（2）非铸铁型（异质）焊缝

1）碳钢焊缝　采用结构钢焊条、纯铁芯氧化型药皮焊条 EZFe－1、低碳钢芯稀释型焊条 EZFe－2、H08Mn2Si 细丝 CO_2 气体保护焊焊接铸铁，得到钢焊缝，其第一层为高、中碳钢，具有马氏体组织，第二层以上为中、低碳钢。

2）高钒钢焊缝　采用高钒焊条、高钒药芯焊丝焊接铸铁，焊缝为铁素体上分布大量 V_4C_3 颗粒。

3）镍基合金焊缝　镍基焊条焊接铸铁，其焊缝均为面心立方晶格的镍基合金，一般分布着少量细小石墨，加入球化剂也可使之球化。

4）铜基焊缝。

2.1.2　熔合区

熔合区包括母材半熔化区和焊缝底部未混合区，是焊接冶金极具特殊性和十分重要的区域。铸铁焊接时焊缝种类多，与母材成分差别大，熔合区会产生各种不同的问题，其理论问题和实际问题在各种金属材料焊接中都是很突出的，值得研究和解决。

（1）半熔化区

各种铸铁成分是不同的。可锻铸铁是亚共晶成分，灰铸铁仍在亚共晶成分内，但球墨铸铁因碳含量高、硅含量也较高，通常为共晶成分甚至过共晶成分。灰铸铁母材升温到 1 150～1 250℃进入共晶温度区间以上，成为液体与奥氏体的共晶，共晶温度区间内还有原来的石墨存在。而球墨铸铁母材升温到共晶温度区间内，成为液体加石墨、奥氏体，共晶温度以上在共晶成分时完全成为液体，过共晶成分时还有石墨存在，液相线以上完全成为液体。焊接时半熔化区在冷却速度较快时来不及析出石墨，溶解的碳与铁形成了共晶渗碳体，即半熔化区成为白口。半熔化区成分接近母材。

（2）未混合区

焊缝底部与半熔化区毗邻处为未混合区，其成分从母材向焊缝突变，是不均匀的成分过渡区。未混合区与半熔化区、未混合区与焊缝之间碳及合金元素因浓度不同而进行溶质均匀化过程，延长熔池存在时间可以提高均匀化程度，缩小未混合区宽度。但是碳及某些元素的扩散方向及速度还与不同元素之间的化学亲合力有关，即决定于化学位梯度。化学位与活度存在密切关系，活度越大，化学位就越大。活度也就是有效浓度。碳及某些元素扩散方向及速度确切地说是在活度梯度推动下自动进行的，达到体系自由能降低。

1）焊缝为铸铁的未混合区石墨化元素较焊缝少，冷却速度又较快，易生成白口。通过焊接工艺延长熔池存在时间可使未混合区成分与焊缝均匀一致，石墨化元素浓度提高并向半熔化区扩散，同时在减慢冷却速度的条件下可以避免白口。



2）焊缝为钢的未混合区，碳、硅含量较母材低，其中$w_C > 2\%$的部分必然形成亚共晶白口，$w_C \leqslant 2\%$的部分为竹叶状高碳马氏体和残余奥氏体，内部有大量显微缺陷和微裂纹，见图4.2-2。

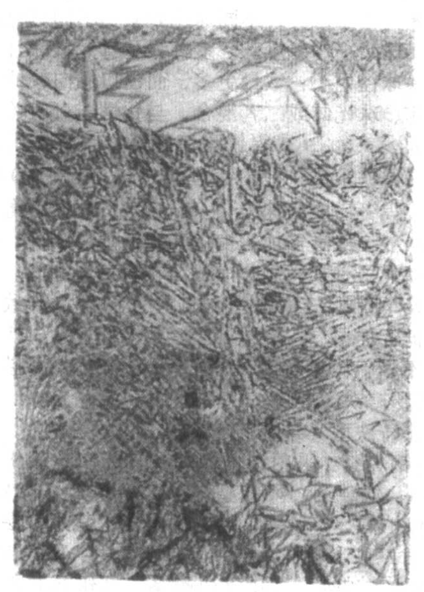


图4.2-2 钢焊条焊接灰铸铁焊接接头金相组织 ×300

上—焊缝 白色为残余奥氏体竹叶状为高碳马氏体；
中—熔合区 亚共晶白口＋高碳马氏体；
下—母材热影响区 高碳马氏体＋残余奥氏体＋片状石墨

3）焊缝为高钒钢，焊缝中的钒混入未混合区，因钒少碳多，仅结合部分碳形成V_4C_3而使自由碳减少，$w_C > 2\%$的部分较焊缝不含钒的钢时变窄。由于钒是强碳化物元素，碳在活度梯度推动下由半熔化区及附近热影响区迅速扩散至未混合区，钒的反向扩散速度慢得多。$w_C < 2\%$的部分是弥散强化的钒合金钢，靠近焊缝处形成狭窄的黑带。见图4.2-3。



图4.2-3 高钒钢焊条焊接灰铸铁焊接接头金相组织 ×300

上—焊缝 铁素体＋V_4C_3 底部为黑带；
中—熔合区 亚共晶莱氏体，上部与黑带之间有马氏体＋残余奥氏体；
下—母材热影响区 高碳马氏体＋残余奥氏体＋片状石墨

4）铜基焊缝：铁在铜中溶解度很小，所以几乎不存在未混合区，电流较小、焊接工艺良好的铜-铁焊条熔合区缩小为半熔化区，半熔化区仅由熔化的母材构成，因此半熔化区白口有时很薄。但有时熔化的母材局部地机械混合在未混合区中形成一块亚共晶白口铁。

5）镍基合金焊缝 镍铁焊缝熔合区组织见图4.2-4。镍与铁无限互溶，镍是奥氏体化元素，又是石墨化元素，未混合区是含镍量变化的镍合金铸铁（$w_C > 2\%$的部分）或镍合金钢，$w_{Ni} \geqslant 15\%$的镍合金铸铁中无渗碳体。未混合区平均含镍量随焊缝含镍量高低而相应变化。纯镍焊条较小电流焊接的熔合区，因未混合区$w_{Ni} > 15\%$，半熔化区也扩散进相当数量的镍，白口仅限于半熔化区，仅0.05 mm厚，个别区段没有Fe_3C。未混合区平均含镍量还与焊接工艺有关，如果熔池存在时间延长，含镍量提高（$w_{Ni} > 15\%$），白口也仅限于半熔化区。但是，焊接时间缩短到1 s、ϕ2 mm以下的焊条瞬间点焊，不论何种镍基焊条其熔合区都不形成白口，原因在于石墨向铁液溶解需要一定的时间，还没有充分溶解，铁液就已凝固。参见图4.2-5。

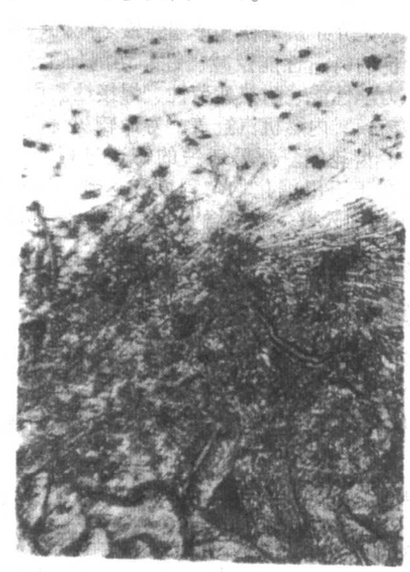


图4.2-4 镍铁焊条焊接灰铸铁焊接接头金相组织 ×300

上—焊缝 镍铁合金固溶体＋石墨；
中—熔合区 亚共晶白口＋石墨；
下—母材热影响区 马氏体＋托氏体＋石墨

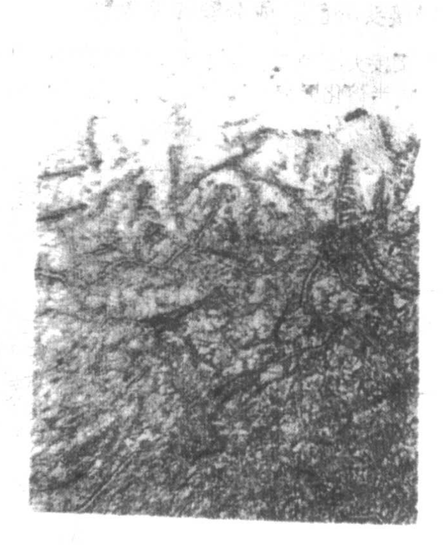


图4.2-5 纯镍焊条小电流焊接灰铸铁起弧处金相组织 ×300

上—焊缝 镍基合金固溶体＋石墨；
中—熔合区 原石墨之间为高碳马氏体＋残余奥氏体＋托氏体仍有少量莱氏体如果瞬间点焊将完全消除莱氏体；
下—焊缝热影响区 托氏体＋片状石墨



半熔化区与未混合区白口是生成一体的，称为熔合区白口更为恰当。灰铸铁的异质焊缝熔合区白口厚度按焊缝金属类型由薄至厚依次为：纯镍（0.05 mm）、镍铜合金、镍铁合金（0.1 mm）、铜基合金、高钒钢、碳钢（0.2 mm）。H08Mn2Si细丝 CO_2 气体保护焊 0.1～0.15 mm，与焊接规范有密切关系。

球墨铸铁含碳量较灰铸铁高0.5%以上，增大了未混合区宽度，因而熔合区白口厚度增加，碳钢及高钒钢焊缝时加厚了50%左右，分别达到和接近0.3 mm，但镍基焊缝时增加较少。球化元素阻碍石墨化，球墨铸铁熔合区白口倾向较大。

2.1.3　热影响区

未发生共析转变的铸铁热影响区，组织、性能变化不大。热影响区主要是指奥氏体区，其温度与碳、硅含量有关，灰铸铁一般为800～1 150℃。奥氏体含碳量及冷却速度决定了淬硬程度及宽度。奥氏体含碳量不仅与原始组织有关，而且与焊接时加热温度及在该温度停留时间有关，因为石墨中的碳会向奥氏体中扩散。因此，焊接热循环可以控制热影响区宽度及硬度。珠光体灰铸铁电弧冷焊时淬硬宽度为1～1.5 mm，硬度300～450HV；300～400℃预热组织由托氏体、索氏体取代马氏体，硬度降至320、250HV；焊后400、600℃回火也可使硬度降至360、280HV。电弧冷焊工艺是采用退火焊道使前一焊道熔合区及淬硬区经受一次短暂的退火，淬硬区马氏体消除，熔合区白口部分消除，硬度明显下降，加工性改善。铁素体球墨铸铁电弧冷焊时淬硬区宽度仅0.02 mm。

2.2　焊接裂纹

铸铁焊接常发生的裂纹有两种：热应力裂纹、热裂纹。

2.2.1　热应力裂纹

热应力裂纹是物体内的热应力引起的拉伸应变超过其塑性变形能力引起的，因此材料塑性越差越易发生。焊接是局部加热过程，焊件内必然产生热应力。焊接应力包括热应力(瞬时应力)、相变应力及冷却后的残余应力。铸铁的塑性与碳的存在形式、石墨的形状有关。灰铸铁虽基体被片状石墨割裂，但600℃以上仍有一定塑性，能发生缓慢塑性变形消除热应力，几乎不产生裂纹。500℃左右塑性开始降低，而400℃以下几乎没有塑性变形能力，因而热应力迅速增大，当达到其抗拉强度时就产生裂纹。因此热应力裂纹从500℃开始，但多发生在400℃左右及以下。热应力裂纹的形式有焊缝裂纹、母材开裂及焊缝剥离。热应力裂纹影响因素有：被焊部位的刚度（拘束度），刚度越大越易形成大的热应力导致开裂；焊缝越长，面积和体积越大，局部温升越高则热应力越大，越易开裂；材料塑性越差热应力裂纹敏感性越高：白口铸铁因板条状渗碳体而非常脆硬，几乎不能承受焊接时的热应力，裂纹很难避免；灰铸铁虽然缺乏塑性，但毕竟不像白口铸铁那样脆硬，能承受一定的热应力，在焊接工艺及材料正确的条件下热应力裂纹完全可以避免，且石墨越细小，力学性能越高，越易焊；球墨铸铁力学性能良好，尤其是铁素体球墨铸铁塑性很好，伸长率达10%～18%，当热应力达到屈服点时发生塑性变形，热应力不再增大，故不易产生热应力裂纹。蠕墨铸铁石墨形状、力学性能介于灰铸铁与球墨铸铁之间，其热应力裂纹敏感性也介于二者之间。可锻铸铁虽然力学性能优良，但因硅、碳含量低，熔合区较难避免白口，严重的白口会导致开裂，焊接工艺上应特别注意，在不产生严重白口的情况下不易产生热应力裂纹。高镍奥氏体球墨铸铁塑性好且不产生白口；而高铬铸铁中碳以粗大柱状共晶碳化物（Cr·Fe)$_7$C$_3$ 形式存在、非常脆硬。它们分别属于球墨铸铁和白口铸铁范畴。

热应力裂纹在塑性材料中也会产生。如船仓补板对接封闭焊缝、大型储油罐底板拼接时，即使母材都是低碳钢板，也易产生典型的热应力裂纹；高锰钢较大面积堆焊时，如果堆焊金属强度很高而抗裂性很好，高锰钢焊接热影响区甚至母材都可能产生裂纹。这显然不属于“冷裂纹”，而母材及焊缝都具有高塑性，称之为“低塑性脆化裂纹”也不够确切。

氢对热应力裂纹的影响：石墨层片间距大，结构疏松，即使扩散到石墨中的氢较多也不会产生较高氢气压，因而不会促使淬硬区或铸铁型焊缝产生氢致裂纹。氢对热应力裂纹的影响很小，这早已从长期实践中观察到并有明确的结论，后经实验得到证实。

从热应力裂纹产生的机理比较焊缝的抗裂性，屈服点低于母材而塑性好的焊缝金属较好，铜基焊缝符合这一条件，实践也证明铜钢焊条能连续焊较长焊缝不开裂、不剥离。其余异质焊条都必须短段焊，否则焊缝立即产生横向裂纹或熔合区裂纹。铸铁型焊缝则以铁素体球墨铸铁抗裂性最好，实践证明焊态无渗碳体、焊缝金属塑性好的铁素体球墨铸铁焊条在铸态球墨铸铁件刚度不大部位上至少可以连续焊长达半米的焊缝不产生任何裂纹，经过放置及随后退火或正火热处理也不再开裂。这是从1982年起就在生产中长期采用的不预热焊工艺。灰铸铁型焊缝只能分段不预热焊才有可能避免裂纹。

焊缝剥离产生于熔合区或母材，有时是无声无息地发展，有时也有明显的金属开裂声，严重时导致焊缝与母材分离，因此也称之为剥离。影响剥离的因素：与焊缝和母材的相对强度、焊缝截面积大小及长度、焊缝附近局部温度升高与母材的温差有密切关系。焊缝金属屈服点越高而母材石墨越多越粗大、强度越低越易剥离；用钢焊条或不锈钢焊条、高钒焊条焊材质差的低强度铸铁时经常发生剥离，而用铜钢焊条最不易剥离；焊接厚壁铸铁件深坡口，层数增加时很容易引起剥离，尤其是焊缝附近局部温度升高，与母材温差增大，往往引起剥离。由剥离的特征和产生的因素，可以判断引起剥离的原因主要是热应力，其次是残余应力，而熔合区白口及淬硬区往往成为薄弱环节，成为裂纹源和扩展区。但母材力学性能太差时会直接在母材上剥离：石墨片量多而粗大时就会发生，剥离的焊缝表面沾满黑亮的母材；白口铸铁、高铬铸铁因焊接工艺不同，剥离面距离熔合区达1～10 mm。局部预热焊灰铸铁可防止熔合区白口及热影响淬硬，但增大剥离倾向。焊接珠光体球墨铸铁时，不采用电弧冷焊工艺会产生剥离性裂纹，采用电弧冷焊工艺甚至速冷热影响区，虽增大淬硬区硬度却减小热应力、反而防止了剥离性裂纹。

国内外有研究者认为剥离属于热裂纹，理由是铸铁熔合区熔点（固相线）低于除铜基以外所有的焊缝合金，且熔合区易生成低熔点共晶，而常用的铸铁是亚共晶成分，结晶温度区间较大；依据是开裂无声、微观形貌属晶间断裂。上述认识虽有一定的道理，但不确切、不全面。异质焊条焊接铸铁时经常存在热裂纹，焊缝多而熔合区少，焊缝热裂纹容易发展连贯成大裂纹，熔合区裂纹较少发展；浅坡口较少发生剥离，深坡口易剥离，这说明应力起作用；材质好强度高的灰铸铁不易剥离，而材质差的低强度铸铁很易剥离，低强度铸铁碳、硅含量高，更接近共晶成分，有效结晶温度区间变小；球墨铸铁多在共晶成分附近，用镍铁合金焊条焊接时不采用异质焊缝电弧冷焊工艺就容易发生剥离性裂纹；用铸铁型焊条焊接灰铸铁时，焊缝大多为共晶或过共晶成分，流动性很好，几乎没有见到焊缝产生热裂纹，但造成剥离却是常见的，且剥落的焊缝表面沾满了铸铁母材晶粒，说明裂纹根本不在熔合区；许多剥离都发生在热影响区甚至热影响区以



外的母材上。上述所列都是熔合区热裂纹说法无法解释或矛盾的。但是，熔合区的热裂纹，尤其是比较严重的热裂纹，有可能成为剥离性裂纹的裂源，但没有应力的作用不易发展。这是长期观察、大量事例分析的结果，并不复杂。

铸铁焊接热应力裂纹的名称、概念、解释在1971年项目组首次提出，其内容被各种书籍及国家标准所采用。其发生的温度始于500℃、多为400℃，较钢的焊接冷裂纹发生温度高得多，产生的原因、影响的因素、防止的方法是不同的，尤其是防止方法及措施几乎是相反的，如不单独提出，既不符合其本质含义，也不利于铸铁焊接技术的推广。美国1983年版《焊接手册》关于铸铁熔焊裂纹原因分析认为："铸铁母材必须能承受局部塑性变形来适应局部加热时焊缝产生的热应力，否则很可能产生裂纹。铁素体球墨铸铁、可锻铸铁承受能力较灰铸铁强。"关于预热引起裂纹的论述："复杂铸铁件预热过程中不均匀的膨胀、大铸铁件小面积局部预热都会造成过大热应力而开裂。设定预热方式时应使预热引起的可能会造成破裂的热应力减到最小"，从未纳入冷裂纹范畴，其论述与热应力裂纹概念完全一致。

2.2.2 热裂纹

铸铁型焊缝有效结晶温度区间小，铁液流动性好，几乎不产生热裂纹；结构钢焊条焊接铸铁时，因碳的熔入使焊缝成为高碳成分，加之硫、磷的熔入，焊缝热裂纹难以避免；铁粉型低碳钢芯、纯铁芯焊条及细丝 CO_2 保护焊使熔合比减小，热裂纹倾向明显降低；钒强烈结合碳生成 V_4C_3，高钒钢焊条抗热裂纹能力很强；镍基焊缝因硫、磷与镍形成低熔点共晶分布于晶界易产生热裂纹，近年来研究表明，适当提高含碳量，适量加入钴及钇或稀土氧化物并限制锰、硅、硫、磷，可提高镍基焊条抗热裂纹能力。

3 铸铁焊接工艺、方法及材料

铸铁焊接材料分为同质铸铁型、异质非铸铁型两大类，其焊接工艺、方法完全不同。优质铸铁型焊条工艺正确时焊缝可与母材有基本相同的组织、硬度、颜色，且无白口，易加工，适于焊补铸造缺陷。可采用大焊接能量的不预热焊工艺、加热减应区法以及热焊；不能采用电弧冷焊工艺，大断面长焊缝难以消除应力，故不宜用于大型机械设备焊接维修。非铸铁型焊缝大多具有良好的塑性，可以采用电弧冷焊工艺消除热应力、减小残余应力、焊接大截面长焊缝、形成具有高承载能力和密封性好的优质焊接接头，适于大型机械设备焊接修复及制造复合结构。

3.1 铸铁型焊缝焊接工艺、方法

3.1.1 热焊

铸件整体或大范围加热到600~700℃，焊接过程不得小于400℃，否则立即升温，在塑性状态下（δ~2%）焊接，热应力很小；焊后600~700℃消除应力。加热方法：煤气火焰、煤炭、木炭。焊接方法：电弧焊、气焊、手工电渣焊。适用于灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁。热焊主要用于汽车、拖拉机铸铁件的焊补，作为一道工序保证质量、降低废品率。手工电渣焊用于特大型铸件的大缺陷补焊。

3.1.2 加热减应区法

框架结构、带孔洞的箱体，如变速箱体、带幅条带轮、汽缸体，即使形状复杂，采用加热减应区法焊接也可取得很好的效果。焊前先加热断裂或裂纹二端所指的部位，裂纹间隙就会张开、加大，立即进行焊接；焊后焊缝与二端加热部位同时收缩，从而减小了热应力避免裂纹。该加热区的作用是减小应力故称为减应区，这种焊接方法称为加热减应区法。用气焊火焰加热，温度一般为600~700℃，其温度及范围主要由裂隙张开量决定，10~20 mm厚的铸件为1.5~2 mm，随厚度加大。焊接方法：气焊可方便地加热减应区、同时焊接，但也可用气焊火焰加热、同质焊条电弧焊。

3.1.3 铸铁型焊缝不预热焊

1）不预热气焊　火焰温度较低，加热比较缓慢，可利用火焰控制铸件上各部位的温度以减小焊接时的热应力，适于较小、不太厚的铸铁件焊补及焊接。采用中性焰或弱氧化焰，操作要领是熔池温度足够高，焊丝插入熔池底部往复摩擦运动，使夹杂、熔渣、气泡浮起聚集，插入填丝，不得滴入。可用相应同质焊丝焊接灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁。

2）铸铁型焊缝不预热电弧焊　加热及冷却速度较快，为了防止白口，一要增强焊条石墨化能力，二要在工艺上加大焊接输入热量，大电流、慢焊速、连续焊，成块的缺陷用泥条或石墨在其周围围筑，连续施焊填满缺陷并加高焊缝，利用电弧热量延长焊缝、熔合区高温停留时间，减慢冷却速度。为了防止热应力裂纹，较长较大的缺陷分段分块，但每块每段仍须连续多层焊，对球墨铸铁、蠕墨铸铁效果较好。在热过程及焊接冶金、工艺特点等各方面都与异质焊缝电弧冷焊工艺完全不同，因此只能称为不预热焊，以便与电弧冷焊相区别。

3.2 非铸铁型焊缝的电弧冷焊

根据对铸铁焊接性特点的分析，在实验和实践的基础上，项目组20世纪70年代初制订出一套完整的非铸铁型焊缝电弧冷焊工艺，其要点概括为："短段、断续、分散焊，较小电流熔深浅，每段锤击消应力，退火焊道前段软。"按此工艺焊接成功率极高。焊道增长应力变大，一定程度就会开裂，故只能焊短焊道；立即锤击焊缝使之发生塑性变形，随时消除冷却收缩产生的拉伸应力直至冷却到与附近温度一致、热应力最小，然后再焊下一段，此即为断续焊。锤击力应适当大，以充分消除应力：材质好的厚件用力应大，薄壁件、材质差时应防止砸坏母材。分散焊是在不同部位施焊，防止某一局部温度升高产生过大热应力。适当的较小电流不仅减小输入热量从而减小热应力，而且减小熔深从而减小熔合区厚度；退火焊道是指在前一焊缝上再焊一焊道，使前一焊缝经受一次退火，由于时间短暂，只有提高温度才能起到作用。因此退火焊道边缘距前一焊缝熔合线1~1.5 mm时，熔合区温度升至800~900℃，白口部分分解；淬硬区马氏体转变成索氏体，加工性明显改善。

电弧冷焊操作手法：一般操作法，每段15~40 mm，不摆动，倒退焊，段间衔接好；分段连续点焊法，引燃电弧形成熔池待与母材熔合好时立即熄灭，焊点未冷又重新引燃、熔合好再熄灭，……，如此循环完成短段的焊接，类似脉冲焊，不仅减小母材受热和热应力，金相观察及硬度测试证实减薄了熔合区白口、热影响区淬硬层的厚度。

厚壁铸件栽丝法：是电弧冷焊时防止剥离重要而有效的措施，壁厚25~30 mm以上可以采用。在坡口两侧钻孔攻丝到不同深度20~40 mm，距离15~30 mm，拧入M6~12 mm钢质螺丝并拧紧，尺寸根据厚度决定，栽丝深度不一可防止应力集中于同一平面。先点焊螺丝与坡口，再焊好过渡层。底层焊条多选用镍铁合金，熔合性较差时可混用部分钢焊条。截面虽因钻孔而减小但仍达原截面70%以上，而机械设计时铸铁材料许用应力小于 σ_b 的10%~20%，仍然是安全的。栽丝法可有效地避免剥离，并减小残余应力，提高承载能力。

镶板法、垫板法焊接：薄壁件出现破洞可用相当于铸件壁厚1/3~1/2的低碳钢板，制成相同形状并砸弯板边形成盘形，镶入后焊接，可大大减小应力防止裂纹，此方法还适于承受工作热应力的机械设备的焊接；垫板法是在大断面坡口



内铺设低碳钢板，焊接两侧、中间塞焊，以便减少焊缝金属，从而减小应力防止裂纹，同时又提高工效。

接头加固：大型受力机械焊接修复后为提高承载能力，可根据具体结构进行加固焊接。凡承受工作热应力的设备不应刚性加固，可设计成弹性焊接接头。

非铸铁型焊缝电弧冷焊可以采用手工电弧焊，焊条有多种，见3.3。还可采用CO_2气体保护焊，包括实芯焊丝、高钒药芯焊丝，焊丝熔化快，容易调整焊接规范并控制线能量及焊缝形状，CO_2气流的冷却作用可减小热应力和淬硬区宽度，对于电弧冷焊铸铁很有利。实芯细丝CO_2保护焊采用ϕ0.6～1.0 mm的H08Mn2Si细焊丝，采用低电弧电压（18～20 V）、小电流（60～90 A）、短路过渡，可减小熔深，从而减少焊缝含碳量至0.4%左右，改善组织、防止裂纹、降低硬度。仍须按电弧冷焊工艺要点施焊，但分段可较采用焊条时长些，窄焊道不摆动。焊接速度应适中，以10～12 m/h为宜，慢了会增加熔合区白口厚度，快了会提高淬硬区硬度。CO_2气体压力200～300 kPa（2～3 kgf/cm^2），流量8～10 L/min，焊丝伸出长度8～10 mm。

3.3 铸铁焊接材料

3.3.1 铸铁型焊接材料

（1）电焊条

1）灰铸铁芯电焊条（通称铸248），自20世纪60年代初研制，70年代中机械化生产。焊芯成分（质量分数,%）：C3.1～3.8，Si2.8～3.5，Mn0.5～0.8，S≤0.06，P≤0.09。药皮加入石墨、硅铁、铝粉以保证焊缝金属石墨化元素含量和石墨化能力，加入少量稀土改善石墨形状，呈团球状，使抗裂性有所提高。焊缝金属成分（质量分数,%）：C3.2～3.8，Si3.5～4.2，Mn～0.5，Al0.3～0.5，S≤0.04，P≤0.10。抗拉强度150～250 MPa，石墨化能力较强，缺陷面积≥8 cm^2，深≥0.7 cm，焊缝高于母材3～5 mm，采用不预焊时可以得到无白口焊缝，硬度≤210HBS。过高的硅、铝会导致焊缝脆化而降低抗裂性，$w_{Al}>0.8\%$会在熔池表面生成Al_2O_3膜使电弧不稳定。作者曾试验$w_{Al}0\sim5\%$，$w_{Al}>1.5\%$焊缝脆化。

2）钢芯石墨化电焊条（通称铸208），药皮中加入石墨、硅铁、铝粉等石墨化元素，通过冶金反应在较慢的冷却速度时焊缝成为灰铸铁。多数焊条厂都生产。石墨化能力较铸248差。最新研究显示新的孕育方法可大大提高其石墨化能力。

3）国外20世纪70年代发明相变应力松弛型铸铁电焊条，我国研究者1984年提出焊缝金属化学成分（质量分数,%）：C3.8，Si3.0，Mn0.75，Mo1.17，Cu1.85，Ba0.005，Ca0.001，在冷却到450℃左右发生贝氏体转变，200℃左右发生马氏体转变，这二次组织转变均伴随着体积膨胀而减小了冷却时的收缩应力，即相变应力松弛，应力小于抗拉强度而避免裂纹。这种焊条不能采用热焊，也不能采用增大局部热量减慢冷却速度的焊法，否则不发生贝氏体、马氏体相变。应在常温下焊接，中等电流，分段（60～80 mm）退焊，段间、层间温度约50℃。缺点是：焊后残余应力高，接近σ_b；焊缝硬度高，只能用于非加工面，限制了广泛应用。

4）焊缝石墨球化的铸铁电焊条。这种焊条的研究难度很大，我国许多研究者将这项研究向前推进，与国际同期研究相比并不落伍，甚至很有特色，在此作较全面的介绍。

此项研究经历了漫长的历程，前20年集中于球墨铸铁焊补的研究，20世纪70年代转向提高球化稳定性、降低白口倾向、提高抗裂性及力学性能、适用多种铸铁焊接的研究。

我国最早于1959年研究了镁球化剂球墨铸铁电焊条，其成分（质量分数,%）为：C4.15、Si3.73、Mn0.24、S0.01、P0.052、Mg0.038。Mg球化元素白口倾向太大，500℃预热仍有较多渗碳体，730℃热焊才能消除。1964年研制出钢芯球墨铸铁焊条，药皮加入石墨、铝粉，球化剂采用硅钙合金加MgO或稀土硅铁加MgO，电弧高温下有部分Mg进入焊缝，球化元素是钙或稀土及镁。预热500～700℃可防止裂纹，焊后须热处理，$\sigma_b\geq392$ MPa，$\delta>3\%$，硬度150～230HB。这就是最早的铸238。因性能差，其很少被应用。同一时期有人研究Ca球化剂的钢芯球墨铸铁焊条，认为钙既是球化元素又是石墨化元素，实验结果是焊缝球化就变成白口，否则就不球化，单一球化元素的试验并未成功。前已叙及，1975年重新研制铸238焊条，焊缝具有标准的球墨铸铁成分（C3.4%、Si2.8%），以稀土镁辅加硅钙合金作球化剂，获得巨大成功：退火后焊缝金属σ_b415～441 MPa、δ10%～13%，正火后σ_b678～735 MPa、δ2.7%～5.3%并以珠光体为主，预热温度降至400℃。这是一项非常好的成果。

1980年研制出铸芯钇基重稀土球墨铸铁电焊条。

1983年研制出铸238SnCu，是低碳钢芯石墨化型药皮，以钇基重稀土为主要球化剂，加入锡、铜，是为了正火态获得珠光体以提高强度。它存在的主要问题是锡的加入量必须达到铸态球墨铸铁允许含量w_{Sn}0.04%～0.05%的3～4倍即0.17%才起作用，但已使焊缝脆化，塑性达不到标准。

钇基重稀土熔点、沸点都很高，但在电弧焊高温下氧化、蒸发仍较严重，球化稳定性不如钇基重稀土气焊丝气焊。白口倾向也不太低，仍需300℃左右的预热。

《铸铁焊补》于20世纪70年代研究了钇、钙分别作为球化元素的效果，表现了基本相似的规律。含量不足不球化，含量达到一定程度球化但白口倾向陡增；而二者组合应用时中间出现了一个既球化而白口倾向又较小的狭窄区域：以钇为主的焊缝球形圆、直径较大、数量较少但白口倾向较大、球化稳定性较差、由钙脱氧保护钇过渡的球墨铸铁焊条；以钙为主的焊缝球形不圆、直径较小、数量较多、白口倾向稍小、球化较稳定、孕育作用较强的焊条。分析认为孕育型更有利于稳定球化和降低白口倾向，在这一途径继续研究，探索多元素联合脱氧、脱硫、加强孕育的效果，取得了较好的结果。

1982年作者研制成功“高球化稳定性、低白口倾向的通用铸铁焊条”。采取全温度范围加强脱氧，脱氧产物为微小质点弥散分布在熔池中，起石墨结晶核心作用，强烈脱硫，获得超低硫的熔池。这种强孕育的超低硫铁液具备了使石墨球化的初始条件，形成了数量多、直径小、短粗蠕虫状及不圆整球状石墨，断口不同于球墨铸铁的细晶大波浪银灰色，而是粗纤维铁灰色，不预热焊厚球铁板无白口、加工面深灰色。焊缝焊态性能σ_b约500 MPa、δ2%～3%。显然这是一种优质蠕墨铸铁焊条，也可以作为通用铸铁焊条。在此基础上再加微量球化元素可以获得稳定的球状石墨。数个使用厂提供的不同牌号球墨铸铁焊接接头相应热处理之后的力学性能为：σ_b402 MPa－δ20%、σ_b496 MPa－δ13.5%、σ_b529 MPa－δ7.5%、σ_b647～690 MPa－δ5.5%。除特大刚度部位的深缺陷外，大面积和长缺陷在实际生产中采用不预热焊接无裂纹。详见5.2.2。焊接长期高温使用过的不太厚球墨铸铁如同焊接低碳钢一样容易。焊接蠕墨铸铁、可锻铸铁、高强度灰铸铁、高温使用后的变质铸铁均取得很好效果。焊蠕墨铸铁石墨呈球状，接头力学性能与母材相同；生产中用于焊灰铸铁的比例很大，用于中等厚度效果最好。壁厚15 mm不预热多层焊15～20 g以上的焊缝金属硬度约200HB，熔合区191～202HB，第三层已球化，金相组织见图4.2-6。焊接可锻铸铁熔合区石墨呈蠕虫状、枝晶状，焊缝石墨呈球状、团

球，基体为铁素体加珠光体（25%）。

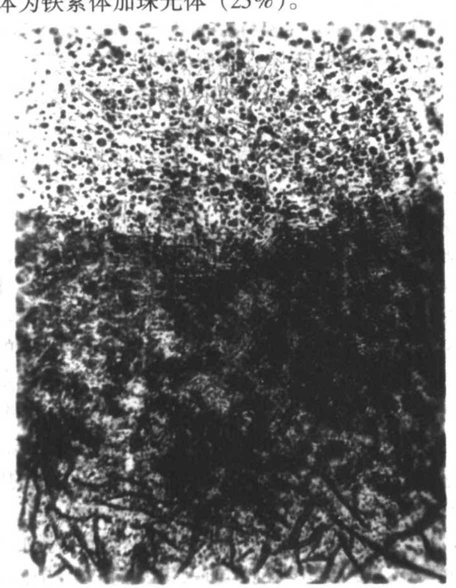


图 4.2-6　通用铸铁焊条铸 268 焊接灰铸铁金相组织　×100
（ϕ5 mm 焊条 200 安、多层熔敷 20 克焊缝金属、焊态）
上—第二、三层焊缝　铁素体＋珠光体（少）＋小球状石墨；
中—第一、二层焊缝　珠光体＋铁素体＋团状石墨，
下—熔合区　珠光体＋铁素体＋团片状石墨，
母材热影响区　珠光体＋铁素体＋片状石墨

焊缝化学成分的确定：对球墨铸铁焊缝韧性、塑性影响最大的是锰、磷、硅。为了提高韧性和塑性，必须尽量降低磷和锰。硅在球墨铸铁中超过一定含量会因过度固溶强化而造成脆化——硅脆，故球墨铸铁含硅量在 3% 左右或以下；铸态铁素体球墨铸铁在降低锰、磷前提下可将硅提高至 w_{Si} 3.5%。球墨铸铁焊缝石墨球径较铸造球墨铸铁小得多，其韧性、塑性与成分的关系专门进行了研究，硅对球墨铸铁焊缝冲击韧度的影响如图 4.2-7。由图 4.2-7 可见 w_{Si}3.5% 时韧性最高，然后开始下降，但 4.0% 时与 3.0% 相近，仍达最高值的 95%、约 76 J/cm^2，4.5% 时约 60 J/cm^2，为最高值 80 J/cm^2 的 75%。但 w_{Si}4% 时孕育作用比 3.5% 时强很多，渗碳体大为减少而铁素体明显增多；从塑性来看伸长率也未降低。因此球墨铸铁焊缝 w_{Si}4.0% 时远未造成硅脆，选择 w_{Si} 4% 左右是安全的，实际应用也证明了这一点。铝的孕育作用经实验证明是最强烈的，减少渗碳体、增加铁素体及石墨球数效果非常明显，在一定含量内没有不良作用。但 w_{Al} > 0.8% 之后易形成 Al_2O_3 夹渣及气孔，更多时会影响电弧稳定性并产生铝脆，w_{Al}1.5% 时就已明显。

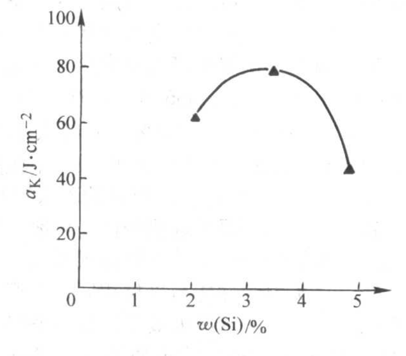


图 4.2-7　球墨铸铁焊缝含硅量对冲击韧度的影响

钡及钙的加入量经反复实验确定，以完全消除片状石墨、渗碳体量最低，同时获得纤维状塑性断口、力学性能达到高而稳定为准；球化元素残留含量以石墨刚变圆、力学性能进一步提高、但不明显增大白口倾向为准，仅为常规含量的 1/3～1/6。焊缝化学成分（质量分数,%）：C3.1～3.6、Si3.8～4.0、Mn＜0.5、Al0.4～0.7、P＜0.03、S0.001～0.01、Ce0.01～0.02、Mg0～0.009、Ba 和 Ca 适量。

厚大球墨铸铁件 10 cm^3 以上缺陷中等焊接电流多层连续焊时焊缝硬度 230～250HB，采用短段焊、断续焊的异质焊缝电弧冷焊时焊缝硬度 278HB。某使用厂所作的焊接工艺研究及与气焊对比见表 4.2-3，可见其电弧冷焊的硬度、组织与不预热气焊接近，见图 4.2-8，有少量渗碳体，虽离电弧冷焊要求还有一段距离，但已经相当不错。如果采用不预热连续焊＋硅酸铝纤维保温（该厂称为电弧冷焊），焊态焊缝金属完全没有渗碳体、铁素体 50%～85%、硬度 170～210HB，熔合区渗碳体 0～3%、铁素体 7%～85%、硬度≤225HB。铸态球墨铸铁不预热连续焊接头金相组织见图 4.2-9，焊后未保温。这样的组织具有很好的塑性，是大面积大长度焊缝不预热焊不产生热应力裂纹的原因和组织性能基础。

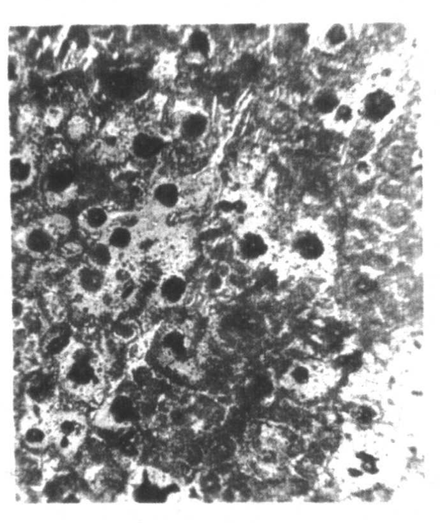


图 4.2-8　通用铸铁焊条铸 268 电弧冷焊一层金相组织　×400
（ϕ5 mm 焊条、200 A、稍摆动短段长 40 mm，
珠光体＋球状石墨＋少量莱氏体　硬度 278HB）

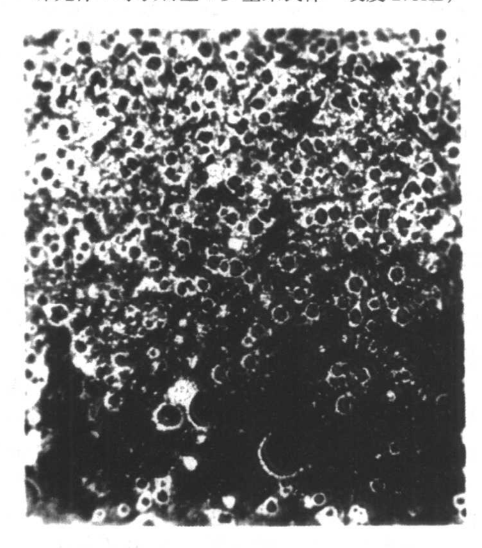


图 4.2-9　通用铸铁焊条铸 268 不预热连续焊金相组织　×100
（ϕ5 mm 焊条、200 A、稍摆动短段、连续三层）
上—焊缝　铁素体、珠光体各 50%＋球状石墨　硬度 170～210HB；
中—熔合区　珠光体＋牛眼状石墨　硬度 225HB；
下—母材铸态、珠光体＋铁素体（少）＋大球状石墨



表4.2-3 某厂焊接工艺研究：铸268与气焊焊补试样的金相组织及硬度

项目 \ 试样号			01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
焊条种类			铸268	铸268	气01	气02	铸268	铸268	气02	气01	气01	气02
焊补方法			电弧冷焊，断续焊，焊后空冷	电弧冷焊，连续焊+硅酸铝纤维保温	气冷焊，焊后空冷	气冷焊，焊后空冷	电弧冷焊，连续焊+硅酸铝纤维保温	电弧冷焊，连续焊+硅酸铝纤维保温	气冷焊+硅酸铝纤维保温	气冷焊+硅酸铝纤维保温	气冷焊+硅酸铝纤维保温	气冷焊+硅酸铝纤维保温
试样处理状况			焊态	焊态	焊态	焊态	退火	焊态	焊态	退火	焊态	焊态
焊缝区	石墨	球化等级	2级	2级	2级	1级	2级	1级	1级	1~2级	1级	1级
		球径等级	<1级（400倍下相当100倍时1级）	<1级呈点状小球枝晶状分布	1级	1级	<1级呈点状小球枝晶状分布	1级	1级	1级	2级	2级
	基体组织		珠光体（呈树枝状分布）+渗碳体（包括莱氏体）25%	珠光体50%+铁素体	表层：珠光体80%+莱氏体10% 内层：珠光体80%+铁素体	表层：珠光体65%+莱氏体10% 内层：珠光体85%	铁素体95%（破碎状）	铁素体85%	铁素体90%（呈条状）	铁素体100%	珠光体55%+铁素体	珠光体30%+铁素体
	HB		278	170	表层：297	表层：274	退火后174，焊态176	210	195	退火后157，焊态225	195	179
熔合区	石墨	球化等级	由焊缝2级过渡至母材2级	1级	2级	1级	1级	由焊缝1级过渡至母材1级	1级球+D型石墨	1~2级	由焊缝1级过渡到母材1级	由焊缝1级过渡到母材2级
		球径等级	由焊缝<1级过渡至母材2级	1级	2级	2级	1~2级	由焊缝1级过渡至母材2级		1~2级	由焊缝2级过渡到母材3级	由焊缝2级过渡至母材3~4级
	基体组织		珠光体80%+渗碳体20%	珠光体90%+渗碳体3%	珠光体90%+渗碳体5%	珠光体85%+渗碳体3%~5%	铁素体95%	由焊缝铁素体85%过渡至母材珠光体90%	枝晶石墨处铁素体10%，珠光体90%	铁素体100%	由焊缝珠光体55%过渡到母材珠光体85%	由焊缝珠光体30%过渡至母材珠光体85%
	HB		260	225	288	262	162	124	217	141	212	211
母材	石墨	球化等级	2级	2级	2级	2级	2级	1级	1级	1级	2级	2级
		球径等级	2级	2级	2~3级	2~3级	2~3级	2级	2级	2级	3级	3~4级
	基体组织		珠光体80%+牛眼状铁素体	珠光体85%+铁素体	珠光体90%	珠光体85%+铁素体	铁素体95%	珠光体90%+牛眼状和破碎状铁素体	珠光体60%+牛眼状铁素体35%	铁素体100%	珠光体85%+牛眼状铁素体	珠光体85%+牛眼状铁素体
	HB		200	197	195	194	152	224	203	141	205	210

这种焊条有很强的通用性，故命名为通用铸铁焊条，称铸268。与通用性很强的镍铁合金焊条相比，除不是电弧冷焊焊条之外，有许多独特的优点胜过镍铁合金焊条。例如适于不预热焊、焊球墨铸铁等不易剥离，效率高，接头力学性能好等。

1987年研制出的铸238F是低碳钢芯、石墨化药皮含球化剂、并加入孕育剂铋的焊条，焊态焊缝金属 $\sigma_b \geq 490$ MPa、$\delta \geq 1\%$，20 cm^3 以上的较大缺陷采用大电流连续焊，焊态硬



度180~280HB。微量铋有一定的孕育作用和球化作用，与Ce等稀土元素形成高熔点化合物成为结晶核心。但白口倾向并不太低，且经热处理后未能达到GB 1348—1988规定的力学性能。《焊接冶金与工艺》介绍了近年来的研究，在确定焊缝基础成分（%）：w_C3.7、w_{Si}3.4、w_{Mn}0.4、w_S0.015、w_P0.015之后，按照脱氧、脱硫、加强孕育、优选球化元素及其含量、增加石墨球数及铁素体含量，从而减少生成白口倾向的方法进行实验，得出孕育作用较强的元素是铝、铋、钡、钙、铈。采用ϕ5 mm粗焊条，大电流240 A，不预热，50 s连续焊满16 mm厚球墨铸铁小试板（120×100 mm）上的ϕ20×8 mm孔（相当于熔敷20 g焊缝金属）。优选法实验获得以下成分组合（%）：w_{Al}0.55~0.65、w_{Ba}0.005~0.008、w_{Ca}0.004~0.010、w_{Bi}0.004 3~0.007 5，基础成分如上所列。此成分较前述高球化稳定性低白口倾向的通用铸铁焊条增加了微量铋而降低了硅约0.5%。在研究奥贝球墨铸铁焊条时试验了含硅量对焊缝力学性能的影响：在试验范围w_{Si} 2.9%~3.8%内，随硅的增加，焊缝渗碳体减少，残余奥氏体增加，强度和塑性都增加；冲击韧度在2.9%~3.6%之内也随w_{Si}增加而增加，然后才下降，但气焊时w_{Si}3.8%时冲击韧度还未下降。过高w_{Si}冲击韧度下降的原因是奥-贝化处理之后焊缝出现珠光体。这样成分的球墨铸铁焊缝和焊接接头经奥-贝化处理，即在900℃保温奥氏体化，370~400℃盐浴等温淬火保持一定时间，σ_b>1 000 MPa，δ达8%~9%。铜、镍与钼合金化可提高临界奥-贝化厚度或直径。w_{Cu}0.54%、w_{Mo}0.25%可由非合金化的10 mm提高到33 mm，w_{Ni}0.63%、w_{Mo}0.25%达35 mm，w_{Cu}0.54%、w_{Ni}0.63%、w_{Mo}0.25%达40 mm，力学性能也有提高。文献《铸铁焊接冶金与工艺》从韧性考虑确定w_{Si}3.4%，而在《焊接手册》中认为3.6%或3.8%（气焊）时韧性、塑性、强度最高，这与铸268已相差很小。此外，单纯用单位面积上的石墨球数可以评价孕育作用，而评价石墨化能力并不准确，实验证明采用石墨体积分数更为恰当。如含微量铋复合孕育的ZQ-1新型"冷焊焊条"焊缝硬度>50HRC、铸238F白口倾向也并不太低。铋孕育作用强，但并未表现出明显的石墨化能力。

（2）气焊丝

灰铸铁气焊丝化学成分见表4.2-4。

表4.2-4　灰铸铁气焊丝化学成分

（质量分数）（摘自GB/T 10044—1988）　%

铸铁焊丝型号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
RZC-1（热焊用）	3.20~3.50	2.70~3.00	0.60~0.75	0.50~0.75			
RZC-2（不预热）	3.50~4.50	3.00~3.80	0.30~0.80	≤0.50	≤0.10		
RZCH（合金铸铁）	3.20~3.50	2.00~2.50	0.50~0.70	0.20~0.40		1.20~1.60	0.25~0.45

球墨铸铁气焊丝化学成分见表4.2-5。

表4.2-5　球墨铸铁气焊丝化学成分

（质量分数）（摘自GB/T 10044—1988　%

焊丝型号	C	Si	Mn	S	P	Ni	Ce	球化剂
RZCQ-1	3.20~4.00	3.20~3.80	0.10~0.40	≤0.015	≤0.05	≤0.50	≤0.20	
RZCQ-2	3.50~4.20	3.50~4.20	0.50~0.80	≤0.03	≤0.10			0.04~0.10

注：表中球化剂是指球化元素含量总和。

氧-乙炔火焰焰心温度3100℃，比电弧温度低得多，因此，采用各种球化元素焊缝都易球化。但球化元素沸点越高，蒸发越少，球化就越稳定，越不易发生球化衰退——石墨球形变差甚至变为片状。Y沸点在3 000℃以上（3 038℃、3 200℃，不同资料来源），熔点1 503℃；Ce沸点2 930℃（其他资料：3 471℃、3 468℃），熔点804℃；Mg沸点1 107℃（另说1 150℃、1 108℃），熔点650℃，低于熔池温度，故较Y、Ce球化稳定性差。RZCQ-1用Ce作球化元素具有一定的球化稳定性。Y作球化元素的气焊丝化学成分（质量分数，%）：C3.2~3.6、Si3.1~4.0、Mn0.4~0.7、P≤0.12、Y0.17~0.23，S<0.01。焊接接头力学性能：正火态σ_b608~641 MPa、δ1.4%~4.4%（均值3.5%），退火态σ_b423~449 MPa、δ9.6%~13.0%（均值11.3%），达到QT600-3、接近QT450-10，910℃正火可达到QT700-2指标。至球化衰退的施焊时间可达30 min，较稀土镁球墨铸铁焊丝延长一倍。钇球墨铸铁气焊丝较之用作电焊条性能、效果好得多，是因为热源温度低，球化元素过渡系数高而且稳定，尤其是Y；气焊时用火焰加热及缓冷，也易避免白口。但气焊火焰功率低，热量分散，焊接效率低，只适于焊补小铸件、小缺陷，劳动条件也较差，在焊补中的作用远不及电弧焊。

3.3.2　非铸铁型焊接材料

1）钢焊条　最大优点是与铸铁熔合性好，优于任何其他焊条，尤以石墨片粗大或变质铸铁最为明显。缺点是第一层焊缝因母材熔入，w_C高达0.7%~0.8%，硬度高，难以锤击变形消除应力以防止热应力裂纹；也易产生热裂纹，且熔合区白口厚，不能机械加工。只能用于非加工面，或与镍基焊条配合使用。例如用镍基焊条打底，再用钢焊条；或栽丝法焊难熔合的厚壁铸铁件时用钢焊条、镍铁焊条混合打底可改善熔合状况。常用以下三种。

① 纯铁芯焊条（国标EZFe-1），目的是降低焊缝含碳量，药皮含有一定数量的碳酸盐及Fe_3O_4、铁粉，具有一定的氧化性及稀释性，从而降低焊缝含碳量，较以前的强氧化性钢芯铸铁焊条铸100熔池氧化反应弱，母材熔入量减少，加之铁粉的稀释作用，性能有明显改善。

② 低碳钢芯铁粉稀释性焊条，是低熔点药皮碱性焊条，加入低碳铁粉药皮导电、分散电弧热量、减小熔深同时稀释焊缝，在较小电流时焊缝含碳较纯铁芯弱氧化型焊条（EZFe-1）还低一些，约0.5%。国标定为EZFe-2型。

③ 低碳钢焊条，通常采用结506、结426（即E5016、E4316）碱性焊条，效果较结422（E4303）好，但不如前两种，焊缝热裂纹难以避免。

2）高钒钢焊条　通称铸116、铸117，通过药皮过渡钒，焊缝w_V8%~13%，钒强烈结合焊缝中的碳形成V_4C_3微粒，弥散分布于晶内及晶界，基体成为铁素体，不易产生热裂纹，单层硬度200~240HB。焊缝w_{Si}<0.5%~0.7%，否则焊缝塑性及抗裂性明显下降。高钒焊缝力学性能很好，σ_b可达558~588 MPa，σ_s343 MPa，δ28%~36%，适于焊接高强度灰铸铁、蠕墨铸铁、球墨铸铁。高钒焊条焊接铁素体为主的球墨铸铁，焊接接头抗拉强度达到或接近母材，如焊QT40-10（旧牌号，σ_b≥392 MPa、δ≥10%）接头σ_b402~407 MPa。高钒焊条均为碱性药皮，钒过渡系数为70%~76%。高钒焊条的缺点：熔合区白口厚度仅略低于钢焊条，与电流大小有关；未充分混合区邻近熔合区白口为一很窄的黑带，是因钒与碳有很强的化学结合力、在活度梯度推动下碳扩散与钒结合成碳化钒形成的，硬度较高，因此加工性较差；再者，因高钒焊缝屈服点较灰铸铁高，焊缝冷却收缩易产生较大的应力，焊低强度铸铁时较易发生剥离。国标规定高钒焊条型号为EZV。



3）铜基焊条 铜在铁中的溶解度很小，但铜与铁可以实现焊接，并有一定的结合强度，纯铜焊接铸铁 σ_b 可达 78～98 MPa。铜焊缝底部不溶入铁，故熔合区仅由熔化的母材构成，不存在未混合区。铜是石墨化元素，有利于减轻熔合区白口。铜焊条中加入适当比例的铁，可以提高电弧稳定性，改善焊接工艺性，同时提高结合强度及焊缝抗热裂纹能力。铜与铁的适当比例是8:2，称为铜-铁焊条或铜-钢焊条，焊接灰铸铁接头抗拉强度一般为 100～130 MPa，最高可达 150～196 MPa。焊缝为铜、铁混合物，焊缝底部钢呈片状，中部呈球状或块状分散分布。由于铸铁熔化后溶入焊缝的铁中，成为高碳钢成分，具有马氏体组织，甚至还有少量亚共晶白口铁。熔合区白口厚度取决于铸铁熔化深度，即取决于焊接电流大小，如果焊条焊接工艺性好，采用小电流，可以观察到熔合区仅为半熔化状态，厚度很薄。但由于焊缝中的高硬度高碳钢及亚共晶白口铁，铜钢焊缝加工性并不好。此外，由于以铜为基，熔池结晶后期氧化亚铜与氢作用生成水汽、与一氧化碳作用生成二氧化碳，来不及析出而在晶间形成针状气孔，破坏焊缝的致密性。如果在药皮中加入 Fe_2O_3 和石墨，反应生成多量气体，使熔池沸腾，可以完全消除气孔，但热输入量增加且焊接时烟尘加大。一般采取锤击法消除应力的同时也提高焊缝致密性，是完全有效的。铜铁焊条电弧稳定性及焊接工艺性还是较差，且不宜用于多层焊。铜铁焊条最大优点是：焊缝金属屈服点低于普通灰铸铁抗拉强度，焊接时热应力达到其屈服点时焊缝发生塑性变形，因而热应力不再增大，小于铸铁 σ_b，不会引起热应力裂纹。所以铜铁焊条在所有铸铁焊条中具有最高的抗热应力裂纹能力，焊低强度铸铁时不易剥离，焊薄壁铸铁件母材不易破裂。但仍需按电弧冷焊工艺施焊。铜铁焊条可以在紫铜芯外包低碳钢皮经拔丝模包紧、外涂药皮，也可用紫铜丝作焊芯、外涂含低碳铁粉的药皮。由于其他焊条的发展，铜铁焊条的应用渐少，GB 10044—1988 中也未列入。低碳钢焊条外缠铜片或铜丝的铜铁焊条虽有应用，但焊接工艺性很差，熔渣和焊缝金属混杂在一起得不到纯焊缝金属，仅用于焊补要求很低的非加工面，焊补质量是很差的，不宜推荐采用。为此，有的书籍详细介绍了铜芯铁皮焊条的自制方法及药皮配方，在此简介如下：ϕ2.5～3 mm 紫铜丝长300～400 mm，外包 0.25～0.3 mm 厚、4.9～7 mm 宽的同长度低碳钢皮，经 ϕ3.0 mm 或 ϕ3.6 mm 孔径的模子手工拔过包紧制成焊芯，外涂下述配方的药皮（质量分数，%），大理石 42、萤石 6、石英 9、硅铁 6、钛铁 25、碳酸钾 12，水玻璃粘结、凉干、200℃烘干。容易自制，性能优良。

4）镍基焊条 镍基焊条大致分为三类：纯镍、镍铁、镍铜合金系统。镍与铁、镍与铜都能无限互溶形成固溶体，高温时能溶解一定量的碳，随温度下降析出石墨。

① 纯镍铸铁焊条通称铸 308，是纯镍焊芯、石墨型药皮焊条，GB 10044—1988 按熔敷金属（多层堆焊）化学成分规定有两种型号：EZNi－1，$w_{Ni} \geqslant 90\%$、$w_{Mn} \leqslant 1.0\%$、$w_{Si} \leqslant 2.5\%$；EZNi－2，$w_{Ni} \geqslant 85\%$、$w_{Si} \leqslant 4.0\%$、$w_{Mn} \leqslant 1.0\%$、$w_{Cu} \leqslant 2.5\%$、$w_{Al} \leqslant 1.00\%$。EZNi－2 有合金强化和更强的石墨化能力。采用正确的电弧冷焊工艺时第一层焊缝含镍大于60%，未混合区平均含镍量高且镍向半熔化区扩散，阻止碳的反向扩散并促进石墨析出，因而白口被局限于半熔化区且呈断续状，平均厚度仅约 0.05 mm，是冷焊焊条中最窄的，热影响区硬度一般≤250HB，焊缝金属 130～170HB，在异质焊条中具有最好的加工性、焊缝软且塑性好，容易锤击发生塑性变形消除应力，防止热应力裂纹；焊缝金属 $\sigma_b \geqslant 240$ MPa，焊接接头 σ_b 约 140～200 MPa，与中等强度灰铸铁相当，焊缝颜色与母材相近，是焊灰铸铁最好的焊条。其主要缺点是与材质差的铸铁熔合性较差，价格也最贵。适于加工性要求高的小缺陷、重要灰铸铁件（如汽缸）单层或缺陷底层的焊补。

② 镍铁合金焊条通称铸 408，是镍（53～60）铁合金焊芯、石墨型药皮焊条，GB 10044—1988 按熔敷金属化学成分规定了三种型号：EZNi Fe－1，$w_{Si} \leqslant 2.5\%$、$w_{Mn} \leqslant 1.8\%$；EZNiFe－2，$w_{Si} \leqslant 4.0\%$、$w_{Mn} \leqslant 1.0\%$、$w_{Cu} \leqslant 2.5$、$w_{Al} \leqslant 1.0\%$，EZNiFe－3 与 EZNiFe－2 相同但 w_{Al} 1.0%～3.0%。w_{Ni} 均为 45%～60%。正确电弧冷焊工艺施焊第一层焊缝金属含镍量 35%～45%，已不是镍基而是高镍合金钢范畴，此成分线膨胀系数低，见图 4.2-10，因而热应力小，抗裂性好；含铁量高因而熔合性好。未混合区平均含镍量仅为纯镍焊条的60%，因而熔合区白口较纯镍焊缝时厚1倍，约为 0.1 mm，热影响区硬度≤300HB，焊缝金属硬度 160～210HB，加工性也较好；焊缝金属 σ_b 与研制水平有关，一般为 400～500 MPa，δ 可达 10%～20%，适于焊接高强度灰铸铁、蠕墨铸铁及球墨铸铁。用镍铁焊条焊接球墨铸铁，焊接接头 σ_b 只能达到 400 MPa，有的焊条还达不到，因此只适于焊接力学性能要求不太高的部位。从接头力学性能上看，尚不如高钒焊条。从化学成分上看，EZNiFe－2、EZNiFe－3 含硅量控制在上限，接头强度即可提高。《铸铁焊接冶金与工艺》认为：由于镍基合金焊缝石墨为片状，加入稀土等球化剂可使石墨球化，可同时提高接头强度及塑性，使 σ_b > 400 MPa 且保持稳定，例如 w_C2.38%、w_{Si}0.95%、w_Y0.0083%、w_{Co}1.207%时 σ_b > 400 MPa 且塑性及抗热裂纹性能较好。但进一步用碳化物元素弥散强化的方法使焊缝 σ_b > 618 MPa、σ_s415 MPa，由于未混合区不可能同样合金化、强化，接头 σ_b 也只不过 483 MPa。

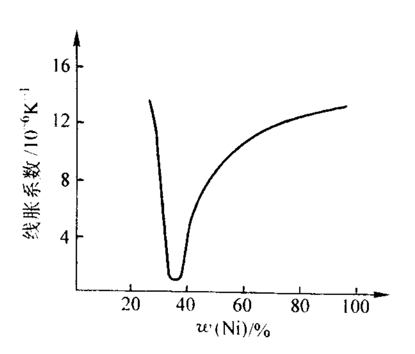


图 4.2-10 镍铁合金线膨胀系数

镍铁合金焊芯电阻率 0.45 Ω·mm²/m，为纯镍芯或低碳钢芯的4.5倍，焊接时焊芯易发红，为此研究了镍铁铜合金焊条，采用镍铁镀铜焊芯或镍铁铜合金焊芯，焊缝熔敷金属化学成分与镍铁焊条相似，含镍仍为 45%～60%，含铜 4%～10%，铁相应减少。各种性能与镍铁焊条相似，但解决了红尾问题。GB 10044—1988 规定其型号为 EZNiFeCu。

③ 镍铜合金焊条通称铸 508，是镍铜合金（Ni70Cu30 又称 Monel 合金）焊芯、石墨型药皮焊条，熔合区白口厚约 0.07 mm，焊缝硬度 150～190HB，加工性较好。但镍铜合金收缩率高达 2%，故焊接时焊缝收缩引起较大热应力，引起焊缝产生横向裂纹，故必须运用电弧冷焊工艺锤击消除应力防止开裂。镍铜焊条焊接铸铁接头强度较低，低于 HT200 的抗拉强度，只宜用于普通灰铸铁加工面小缺陷补焊。由于镍铜合金焊条有上述缺点，加之热裂纹倾向也较大，价格较贵，其应用明显少于纯镍和镍铁合金焊条。

4 灰铸铁的焊接

4.1 灰铸铁的电弧焊

4.1.1 非铸铁型（异质）焊缝电弧冷焊

（1）加工面焊补

加工面是指焊后须进行机械加工的表面，包括普通加工面和工作时互相摩擦的“滑动配合”面。汽缸体、汽缸盖平面、齿轮箱加工面都是普通加工面，机床导轨面属于滑动配合面。普通加工面只要求焊补区机加工后达到精度要求、熔合区及淬硬区表面不高于母材即可；而滑动配合面除加工精度之外焊补区硬度也需符合要求，否则工作中会划伤相对滑动部件的工作面。非铸铁型焊条中纯镍焊条熔合区白口最轻微、焊缝硬度较低，具有最好的机加工性，加之强度与普通灰铸铁相近，是焊补加工面最优秀的焊条。上述铸铁件加工面上的小缺陷在采用正确的异质焊条电弧冷焊工艺条件下，焊后都能顺利加工并达到加工要求；机床导轨面上的缺陷也可同样焊补，但机床导轨划痕则应采用更细的纯镍焊条（ϕ2.0 mm），和分段连续点焊或瞬间点焊的操作手法，熔合区白口很轻微甚至消除。分段连续点焊的操作手法是引燃电弧形成熔池，与母材熔合好即熄灭，焊点未冷又引燃，形成熔池熔合好再熄灭，如此循环，由许多焊点连续形成一短段焊缝，再锤击，……。瞬间点焊法是用小直径焊条，引燃电弧后不移动、熔合时（熔池润湿母材）立即断弧，形成一个圆形焊点，下一个焊点与这个焊点部分重叠，其熔合区石墨来不及完全溶解，故不产生白口。瞬间点焊焊点间停弧时间较分段连续点焊焊点熄弧时间长。导轨划痕焊补修复实例：转子铣床导轨面划痕多条，总长约 100 m，深 2 mm，宽 3 mm左右。材质为 HT21－40（相当于 HT200）灰铸铁。曾采用纯镍及镍铜焊条焊补，因严重咬边没有成功，改为银钎料氧乙炔焰钎焊，因床体太大（重约 120 t），加热升温达不到钎焊温度，钎缝结合不好，加工时脱落。采用紫铜挡板、纯镍焊条分段连续点焊法修复成功。用圆弧刃扁铲将划痕开成宽 6 mm、深 4 mm 的 U 形坡口，氧乙炔火焰烧除表面油渍，丙酮清洗坡口；加工二块厚 6 mm、宽 60 mm、长 300 mm 的紫铜板，板边 30°、钝边 1 mm，放置在划痕坡口两侧。采用 ϕ3.2 mm 纯镍焊条，150 A 电流，中弧分段连续点焊。由于铜板的冷却作用，电弧被压缩成扁的矩形，由于铜板吸热传热，为熔合好则必须加大电流至 150 A。第一层焊缝因床面内吸收的油未烧尽而产生气孔，焊第二层时无气孔，且第一层内的气孔也在重熔时浮出。第二层用 ϕ4 mm 纯镍焊条，170 A 电流。没有发生咬边，焊后加工很好，使用多年。再如牛头刨导轨面十余处划痕采用基本相同的焊法，但未用铜挡板，采用 ϕ3.2 mm 镍铜焊条，130 A 电流，为防止咬边电弧对准坡口中心不摆动，分段连续点焊成功，熔合区易括研，无咬边，已应用多年。

汽缸体使用过程中因水垢堵塞造成冷却不良，导致排气孔温升过高，停车时冷却，在循环热应力作用下疲劳开裂。这实际上也是一种热应力裂纹，但不是焊接时的热应力而是工作热应力造成。为了保证焊接后使用效果，首先要解决因循环水冷却不良所形成的热应力，否则焊接质量再好使用时间不长又会开裂。采取的办法：用圆刃扁铲开好 U 形坡口，在坡口中部钻 ϕ4 mm 小孔，用钢丝通过小孔将里面的水垢清理干净。焊接时连同小孔封焊。这样处理后使用寿命如同新汽缸。坡口留 2～3 mm钝边，采用 ϕ3.2 mm 镍铁合金焊条，熔合性较好，线胀系数小，使用效果最好；而镍铜合金焊缝应用实践证明容易剥落。汽缸平面其他部位采用纯镍焊条效果还是很好的。但是 ϕ2.5 mm 最粗 ϕ3.2 mm J506 焊条正常电流（ϕ2.5 mm—100A，ϕ3.2 mm125 安）瞬间点焊，每焊点 1～2 s 不移动电弧，焊点重叠 50%，两焊点即锤击，如此打底后上面再焊一层。熔合区白口仅约 0.1 mm，尚可加工。曾焊排气孔间裂纹，使用 5 年后其他排气孔间因冷却不良开裂焊修时，检查此处仍完好无损。

（2）非加工面焊补

铸铁件非加工面的要求各不相同，有的要求接头有一定的强度，有的要求气密性或水密性，有的仅要求不裂、没有气孔夹渣等焊接缺陷。薄壁的仅 5～6 mm 厚，厚壁的达 100 多 mm，壁厚小于 8 mm 时，因铸铁导热差，熔池附近的母材温度迅速升高，壁厚越小温度升高的范围越大，会形成很大的热应力引起裂纹。薄壁一般只在非加工面。薄壁处电弧冷焊时不能用力锤击，否则会砸坏；薄壁处刚性小，锤击焊缝塑性变形小，消除应力效果差。异质焊缝电弧冷焊时为了防止热应力裂纹应采取以下措施：选用细直径（2～3 mm）焊条，以铜钢焊条最好，其次纯镍焊条，尽量小的焊接电流，以能熔合为宜，较短的分段；缺陷为几条裂纹聚集时，用切割砂轮或钻割成形状规则的洞将其去除，如果离厚壁不远就开到厚壁旁；用一半厚度的低碳钢板按洞形尺寸制备补板，尺寸略大于孔，弯边后锒入点固，再分段连续点焊，由于焊接热应力很低，几乎采用各种异质焊条包括细直径 J506 焊条都可顺利焊接成功。如图 4.2-11 所示为汽缸水套外壁因冬季气温骤降水结冰膨胀而胀裂，以及汽缸因曲轴连杆故障将缸壁捣破，均可采用上述锒板法焊接，成功率十分高。锒板方法亦如图所示。如焊接位在内部，为了便于施焊可先将外壁割去，焊好内部，并检验不漏后再补焊外壁。

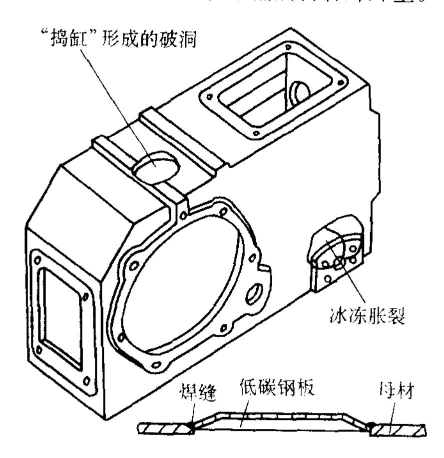


图 4.2-11　气缸体捣缸及冻裂锒板法焊接

（3）压力容器、受力机械等厚壁铸铁机械焊接修复

空压机、液压缸等内部承受气压、液压，工作状态与压力容器相同，气压多为低压，液压有时为高压、可达 36 MPa（350 kgf/cm^2）。凡承受中、高压者均采用高强度灰铸铁或球墨铸铁。高强度灰铸铁含碳量较低并进行了孕育处理，石墨数量虽多但含量较少、细小且分布均匀，焊接时熔合性较好，锤击力也可以加大，消除应力的效果更好，有利于防止热应力裂纹。铸铁压力容器损坏的形式通常是裂纹，如果裂纹方向与圆筒形容器轴向平行，焊后焊缝工作应力是环向的 2 倍，因此要特别注意焊接质量和接头力学性能。虽然灰铸铁塑性很差，拉伸试验时伸长率接近于零，但高强度灰铸铁液压容器损坏后，往往发现开裂处裂隙大且产生错边，这说明已经发生了少量塑性变形。由于内部有时有活塞，如果焊后保留了破裂时的变形，活塞与内壁间必然有过大的间隙，会发生漏油或漏水。因此焊接前应消除变形，恢复到原来的尺寸及配合状态，才能正常工作，达到原设计要求。高强度灰铸铁弯曲试验时允许有一定的挠度，对发生塑性变形的设备，可以具体计算外力恢复尺寸时产生的弹性变形是否在安



全范围内。如果在安全范围内则可以施加外力强制变形，再点固焊接恢复原来形状尺寸。低压工作状态的室压机、主风机常用普通灰铸铁 HT200 或 HT150 制造，熔合性通常较好。由于承受的是空气压力，即使压力较低也不可忽视焊接质量。有的空气低压设备如主风机，本身就承受热应力状态，焊接修复仅仅依靠提高接头强度并不能提高承受热应力的能力。在这种工作状态，裂纹总是首先发生在热应力最大的部位。因此焊接修复时设计为弹性接头、以此取代高强度刚性接头更能承受热应力。

压力机、剪板机、卷板机、空气锤、切苇机、碎木机等各种铸铁机械设备工作时均承受较大的载荷甚至是冲击载荷，损坏的程度往往是比较严重的，有时设备主体断成两截。损坏原因各异，多数为操作失误导致结构受力超过其承载能力而发生断裂或裂纹，也有由铸造缺陷引发，个别情况是某些局部设计强度不足，甚至意外事故造成的损坏。因此这类机械损坏几乎都可以通过焊接修复，经多年的使用证明可以恢复到损坏前的正常状态，甚至超过损坏前的承载能力，或改进设计、改善结构受力状态、提高结构强度、满足使用要求。这类机械多采用高强度灰铸铁，也有采用普通灰铸铁 HT200、HT150 的。熔合性一般较好，焊接时着重防止热应力裂纹、焊缝剥离，并使焊接残余应力降至最小。栽丝法对于防止剥离和热应力裂纹十分有效，并防止应力集中于熔合区，形成高强度、高承载能力、高可靠性、密封性良好的焊接接头。铸铁机械设计时安全系数一般都取得较大，钻孔面积不大于原来截面积的 35%，螺丝紧拧在孔内也能承担部分工作应力，所以栽丝焊接接头强度是足够的。钻孔攻丝深度应不相同，以免应力作用于孔底同一平面。栽丝后用镍铁合金焊条打底焊第一层，亦应采用异质焊条电弧冷焊工艺，螺丝外露部分与母材之间均应焊合。这样就制造了一个易焊的表面。如果铸铁母材熔合性不太好，可以用部分钢焊条与镍铁合金焊条分散交替使用，数量不宜超过 50%，可以用结 506，稀释型低碳钢芯铁粉焊条 EZFe－2 焊条更好，采用细丝 CO_2 气体保护焊也是很好的方法。壁厚 25～30 mm 以上较长的穿透性裂纹应采用栽丝法焊接。壁厚 45～50 mm 以上还应再增加垫板法，以减少熔敷金属量，减小应力，提高效率。这种方法是在栽丝法焊好底层、坡口下部焊好 1/3、坡口有一定宽度时开始采用，按坡口形状尺寸制备垫板、垫实、点固焊接两侧坡口、塞焊中间预留孔，全部过程仍需遵守异质焊条电弧冷焊工艺要点。最后应根据机械的具体结构和受力分析进行加固设计。加固主要不靠螺栓补板，而是用钢板与铸铁机械先牢固地焊接在一起，可根据具体情况进行设计，形成一个坚固、可以承受较大载荷的焊接接头，与铸铁焊接时也可采用栽丝法。还须利用焊接应力使钢板拉紧，存在适当的残余应力，使铸铁机械焊接修复的焊缝工作时，加固钢板分担部分工作应力。长期实践证明，这种铸焊结构加固方法能大大提高原来铸铁机械的承载和过负荷能力，提高工作可靠性。

下面介绍一些典型实例。

例 1 造纸机烘缸裂纹焊接

造纸机烘缸直径 ϕ2.5 m，长 1.8 m，壁厚 80～120 mm，重 18 t，为 HT15－36（即 HT150），承受内压 0.35 MPa（3.5 kgf/cm^2），经多年使用原来小铸造裂纹发展为 50 mm 的明显裂纹，遂进行了焊补。由于焊接工艺制订者不懂铸铁焊接热应力裂纹产生的原因，而是按照防止钢焊接冷裂纹的工艺实施局部预热连续焊，虽然采用了镍铁合金焊条，结果使裂纹延长为 750 mm 大裂纹。正确的作法是首先分析设备的工作状态、受力情况、损坏原因。造纸机烘缸工作状态有一定的热应力，这是造成铸造小裂纹扩展的原因，但扩展速度很慢，说明热应力不大，但是裂纹达到一定长度后扩展速度就会加快，因此适时焊补是正确的。对承受内压的圆筒形容器壁进行应力计算，其最大应力仅 5 MPa，与 HT150σ_b 相比仅为其 3.3%，即使将其许用应力选择为 30 MPa，也是非常安全的。因此焊接时完全没有必要加固。焊接时也只焊接了 2/3 的断面，80 mm 壁厚只用机械方法开出深 52 mm 的坡口，栽 M8 丝、深度不一、间距 20～30 mm，气焊火焰烧油，镍铁合金焊条将坡口两侧底焊过渡层，按异质焊缝电弧冷焊工艺施焊，再焊坡口内至 30 mm 深，余 22 mm 的坡口采用 4 mm 厚低碳钢垫板两侧略弯，锒入后两侧与底层镍铁合金焊缝焊接。焊接成功后应用多年。

例 2 油压机高压油缸的焊接

注塑机高压油缸内径 ϕ220 mm，壁厚 60 mm，重约半吨，最大工作压力 30 MPa，材质为高强度灰铸铁（$\sigma_b \geq 320$ MPa）。因超压工作在法兰直角处产生长 30 mm 的小裂纹，由于油缸的工作条件，该裂纹必须焊好才能应用。第一次采用纯镍焊条未预热连续焊，因焊接工艺错误而失败；第二次改用奥 107 局部 650℃热焊连续焊，因焊接工艺和焊条出错造成过大热应力使裂纹大大延长；第 3、4 次采用铸铁型焊缝整体热焊气焊和电弧焊，因技术问题也未能成功，虽未裂但打压渗漏；第 5 次采用了正确的电弧冷焊工艺但却选用强度低、熔合差、易热裂的镍铜合金焊条，试压渗漏。可见，要焊好高难度铸铁件就必须对铸铁焊接理论和技术真正理解，在焊接材料、焊接工艺、焊接技术各环节都不能出现错误。现在用灰铸铁制造液压缸并不多见，绝大多数都用钢来制造，但此例对制订正确的焊接方案有指导意义。经计算，此缸缸壁最大工作应力为 54 MPa，为 σ_b 的 17%，许用应力选择是正确的，但安全系数并不太大，因此焊接接头强度应不低于母材，$\sigma_b \geq 320$ MPa，坡口应尽量开透；如果采用异质焊条，高钒焊条、镍铁合金焊条都能胜任，细丝 CO_2 气体保护焊也可以。最后选择了镍铁合金焊条及栽丝法：M8 螺丝、间距 20 毫米、深 25～45 mm 各异；ϕ3.2 mm 焊条、130 A 电流、工件接正以利熔合，按异质焊条电弧冷焊工艺严格施焊，先焊坡口栽丝面过渡层，注意坡口间隙不点固，不先焊连接缝，使之处于较自由收缩的状态。焊第一层连接缝焊缝应厚些，从坡口一端开始顺序向另一端进行，逐层填满坡口，焊缝最后呈均匀的凹形，焊接方向与裂纹方向垂直。虽然裂纹由开始的 30 mm 经前 5 次失败的焊接延长至 300 mm，但第 6 次获得完全成功。最后进行试压，在每 5 MPa 停留一段时间逐步消除应力，最后加至 35 MPa 无渗漏。正常使用多年。

例 3 水轮机环形接力器焊接修复

发电厂高水头立轮单转双喷嘴水斗式水轮机环形接力器缸座因偶然事故沿法兰边缘产生裂纹，必须抢修。环形接力器由两个半环形缸座和活塞组成，缸座壁厚 30 mm，重 1 655 kg，为高强度灰铸铁，$\sigma_b \geq 320$ MPa。裂纹长 1 650 mm、裂纹间隙最大 4 mm、错边 6 mm。环形接力器工作压力 2.5 MPa。计算缸壁工作应力仅为20.4 MPa，设计时安全系数是足够大的。由于裂口产生了一定的塑性变形，焊接时应予以消除，恢复活塞与缸体的配合精度防止工作时漏油。这种材质的灰铸铁抗弯强度为520 MPa，跨距600 mm、最大挠度允许达 9 mm，因此在 1 650 mm 长的裂纹边缘加压消除 6 mm 错边不会造成破裂，且装配应力也不会过大，加之设计安全系数大，只要接头强度达到母材强度，焊接应力消除较充分，使用是安全的。具体作法是开好坡口之后，在对应于裂纹长度 430 mm、690 mm、970 mm、1 250 mm 处的缸座上焊牢 4 个 ϕ50 mm 圆钢，圆钢内侧各点焊一个 M20 细牙千斤顶，逐个分别均匀缓慢加载，使裂纹错边在全长上逐渐减小直至消除，见图 4.2-12。焊接工艺：裂纹两端钻止裂孔、开

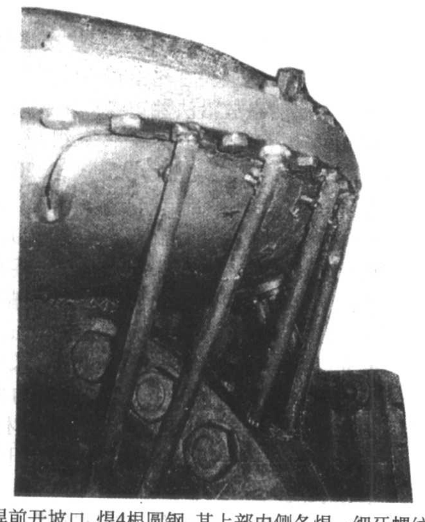
外大里小、60°双U形坡口，间隙和钝边皆为2～4 mm。采用ϕ4 mm镍铁合金焊条、150 A电流、25～30 V电弧电压，直流反接以利减小熔深及全位置焊接。为使焊缝能较自由地收缩以减小横向应力并消除裂缝间隙，坡口不点固。首先分段退焊，坡口两侧打底焊，严格按异质焊缝电弧冷焊工艺进行。然后从一端开始焊连续焊缝，为避免弧坑热裂纹，可从一侧坡口起弧垂直于裂隙方向运动，端部焊厚些并在另一侧坡口收弧，焊一定长度后返回起焊端焊第二层，再第三层……。一、二、三、……层呈阶梯状，再逐渐向前推进，这样使焊缝有一定横向收缩，横向应力小，已焊的几层焊缝厚度大、不易开裂，而坡口间隙逐渐减小易使破裂处恢复原状，保证原来的尺寸形状及配合关系。焊接过程由立焊开始再平焊、横焊至仰焊，立焊时采用立向下焊可使焊缝平整均匀。焊完外侧后将缸座拆下、倾斜30°放稳在地面，用圆刃扁铲清焊根，也可用磨光机。然后封底焊。注意全过程必须严格遵守电弧冷焊工艺，由于材质好、强度高、熔合性好，锤击应用力且快速。此例未采用栽丝法是因为壁厚30 mm又开双U形坡口，而熔合性很好。前已说明此环向接力器强度设计安全系数很大，栽丝法也是可以应用的且更加可靠。焊后未产生任何缺陷，略有错边，最大值<1 mm，修磨后仅有0.5 mm，不影响与活塞的配合。为了检验承压能力及渗漏与否，同时消除应力，每0.5 MPa停留5 min，直至2.5 MPa，检验正常。72 h完成，投入使用已20多年还在使用。见图4.2-12。

例4　炼油厂主风机裂纹焊接

主风机是炼油厂生产的主要动力装置，在一定温度下工作。但工作时温度分布不均匀，存在一定的热应力，内部有空气压力，在设备起动时迅速升温形成热冲击，与气压相加，在设备内形成较大的应力，因此主风机设计时不仅考虑工作应力，同时也要考虑热应力问题，按设计参数使用一般不会出故障。但某炼油厂生产发展很快，原主风机参数明显不足，便将二台主风机串接使用，以提高参数。这样一来，第二级主风机不仅风压提高而且温度升高，温差变大，导致主风机上盖开裂。主风机为蜗壳形上盖，形状如盆，盆口为一圈带孔法兰，口朝下用螺栓与下部装置固定，中间有密封垫圈。上盖上有三道加强筋以提高强度、刚度，加强筋高度约100 mm、厚30 mm。由于加强筋的散热作用，在串接使用后其温度与上盖温差加大，上盖各处温差也较大。热应力与工作应力合成后最大应力出现，因此在开机起动不久，该处产生长100 mm左右的裂纹，共6条，在圆周上均布。但并未影响正常运转，也没有再产生新的裂纹。这是因为开裂释放了热应力，裂纹间隙随热应力变大而张开，热应力不再变大。但是裂纹尖端有应力集中，而灰铸铁片状石墨尖端效应为裂纹的扩展提供了有利条件。厂方担心会迅速扩展，曾请求权威学者进行断裂力学分析计算未获结果，因而转为焊接修复。主风机上盖下部为圆筒状，直径约3 m、厚度28 mm，整机由日本进口，材质为灰铸铁，牌号不详，从裂纹断面形貌、石墨含量特别多及熔合性差可以判断是低强度灰铸铁，低于HT150。由于串接运行，其参数已略超过临界状态，这是损坏的原因，即使焊接修复到开裂前的状态，运行时必然还会损坏，而其结构、形状、材料、运行情况都很难进行加固。所以裂纹虽小，焊接修复的难度却很大。但又不得不修，否则会造成巨大的经济损失。最后报请石油部批准决定焊接修复，规定焊修人员和限期完成时间。焊接工艺方案的制订仍以提高焊接接头强度为主要出发点，开X形坡口，交错二排栽M8丝，因板较薄，栽丝不宜过深。用镍铁合金焊条焊接，不易熔合时混用少量结506焊条，熔合性不太好。严格按异质焊条电弧冷焊工艺进行，焊接质量尚好。用厚度20 mm钢板对主焊缝进行加固。完成后立即进行试运行，单机正常串级，开机后不久加固钢板与母材之间的焊缝崩裂并延伸至母材中约6 mm。但主焊缝未开裂，说明焊接工艺方案基本可行，但加固增大了刚度，影响了最大工作应力、热应力时的变形，因此将厚钢板加固改为厚度6毫米的薄钢板作成弧形板弹性加固，将开裂处磨去、补焊，再与弧形板焊接。弧形板跨接于主焊缝两侧。为了减小热应力，用硅酸铝保温棉将主风机全部包裹，大大减小了筋板、法兰与上盖的温差。再试运行时正常，以后连续正常运行多年未出故障，直至设备更新由一台大型主风机取代。

例5　碎木机轮缘刀座断裂

碎木机是打碎木柴制造纤维板的设备，直径ϕ1.2 m、厚250 mm，轮缘刀座上用螺栓固定刀片，使用不慎将刀座撞断，掉块厚处有6 cm。断口晶粒粗大并呈黑亮色，说明石墨片多而粗大，是低强度灰铸铁。焊接主要困难是剥离，对接头强度要求较高，能承受冲击。曾分别采用镍铜合金焊条、氧化型钢芯铸铁焊条（后称铸100）电弧冷焊工艺施焊，小电流、短段焊、断续焊、充分快速锤击，但堆焊到一定厚度就发生剥离，表面沾满母材铸铁晶粒；



(a) 焊前开坡口，焊4根圆钢，其上部内侧各焊一细牙螺纹千斤顶



(b) 焊接修复后

图4.2-12　环形接力器的焊接修复



后改用钢芯石墨化铸铁焊条不预热焊工艺施焊，情况并未改变：焊到一定厚度自动剥落，表面沾满母材晶粒，断口分析剥离面在熔合区、淬硬区以外的母材上。最后还是采用栽丝法，镍铜合金焊条电弧冷焊工艺打底，低碳钢芯氧化型铸铁焊条焊第二层，低碳钢焊条堆焊以上各层至恢复原尺寸，全部采用电弧冷焊工艺施焊，未再发生剥离，正常使用多年未出故障。这是 1964 年完成的。此例中镍铜焊条打底并非最佳选择，不如纯镍焊条，是限于当时的认识，但毕竟是成功的。本例充分证明同质焊缝不发生剥离、剥离属于热裂纹的说法依据不足。

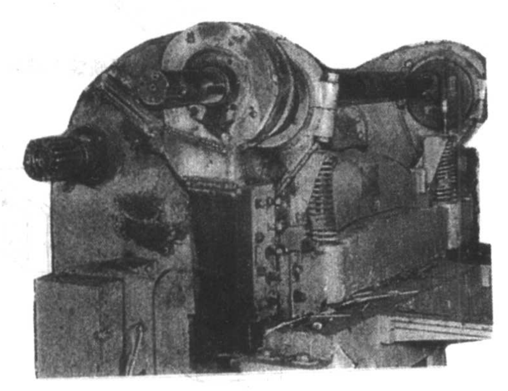
例 6　剪板机机身断裂的焊接及铸焊结构加固

断裂情况如图 4.2-13，断面为矩形，内侧 15 mm，其余 50 ~ 60 mm 厚，由断口及熔合性判断为 HT150 ~ HT200。外侧三边开 V 形坡口留 2 mm 钝边，四角保留原断口定位。取下上块，分别在坡口上钻孔攻丝、用磁铁吸净铁屑、拧紧 M8 螺丝并切断，深 25 ~ 35 mm 不等。然后在坡口表面用镍铁合金焊条、均匀混用 30%结 506 焊条打底，保证熔合良好，栽丝亦与母材焊合，严格执行异质焊条电弧冷焊工艺；下侧带有丝孔的断面并非断裂部位，而是剪板机原来的加厚壁，在此就利用来焊接加固板，故其上也钻孔、攻丝、镍铁合金焊条打底焊制造一个坚固易焊面，以备形成高强度焊接接头。将已焊好栽丝坡口面的上块吊装到剪板机上，按预留的 4 角断口定位、点固，用镍铁合金焊条及结 506 焊条焊接坡口连续缝。上块两侧面加两块厚 20 mm 低碳钢板，其形状如图片所示，内孔与上块圆孔凸台外圆正好形成焊接坡口，用长螺栓穿过拧紧固定，并用镍铁合金焊条将坡口焊满；内侧壁薄且有破洞，只焊一层将裂纹处连接，破洞不补，在外面加一厚 20 mm 低碳钢板，上与圆钢板用结 506 焊接，下与内侧加厚壁上端已栽丝、底焊的坡口用镍铁合金及结 506 焊条焊接，见图 4.2-13；再按外侧形状制备厚 20 mm 低碳钢板，与上块外环钢板间开坡口，用结 506 焊条焊接一半坡口，然后用镍铁合金焊条、结 506 焊条焊接下部与加厚壁已栽丝、底焊的坡口，最后将钢板间坡口焊满。此例中的加固充分利用原设备的结构特点进行了力学分析，设计制造了铸-焊复合结构，使结构强度、承载和过负荷能力成倍提高。在以后的使用中又发生过意外事故却没有损坏设备，现仍在应用。

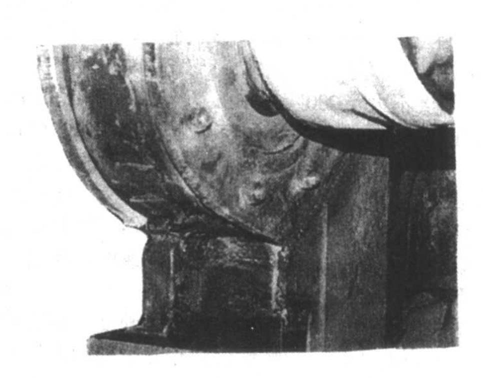
例 7　16 m 立车卡盘破裂的焊接

16 m 大型立车是我国当时仅有的最大的一台立车，是前苏联援助重点项目的重要设备，1974 年一次吊运 60 t 重的设备时钢丝绳断裂，将立车卡盘砸坏。后立即组织了部分著名铸铁焊接专家学者现场研究焊接方案，采用热焊焊接失败。之后由一机部四五计划铸铁焊接组部分成员提出电弧冷焊方案，并组成以哈尔滨焊接研究所工程师为主的焊接组，进行了分析研究、设计计算，制订了正确的工艺，经过 80 天的努力，焊接成功，为国家挽回了损失，至今还在正常使用。

此立车卡盘由四块组成，每块重 45 t，材质为 HT200，其中一块砸坏，产生多条裂纹，总长约 12 m，并断下一块重 1.5 t。卡盘的结构强度设计是依靠下部的几条筋板，而损坏的卡盘主裂纹是在一条⊥形槽内，其位置无法施焊。经过结构设计和强度计算，将这一条⊥形槽焊接起来，其厚度为 80 mm，强度超过损坏之前，而又不影响使用。⊥形槽内的主裂纹因焊不到就不再焊接。卡盘⊥型槽主要焊接接头设计及分枝裂纹如图 4.2-14 所示。为施焊方便，⊥形槽内放一块 2.8 m 长、25 mm 厚的低碳钢托板，中心线上几处钻孔、攻丝，拧入螺丝将托板顶紧⊥槽内的坡口底部。坡口用碳弧气刨开出、磨光机磨光，坡口两侧用镍铁合金焊条打底焊，中间铺 4 mm 厚低碳钢板，与侧壁坡口底焊层仍为 60°坡口，用镍铁合金焊条焊接。全部过程须严格按异质焊条电弧冷焊工艺施焊，且收弧收到低碳钢板上，窄焊道、不摆动，ϕ3.2 mm 镍铁合金焊条电流 130 A，直流正接。补板上部较宽，为提高强度、刚度，每层钻锥度孔，下 ϕ15 mm、上 20 mm，并塞焊。其余裂纹凡是能焊到的均采用镍铁焊条并严格按异质焊条电弧冷焊法施焊，总是按开坡口、栽丝、打底焊、焊连接焊缝、深而宽的坡口和垫板的顺序和工艺措施；无法焊到而又不影响结构强度的裂纹就不再焊接。卡盘主体上的裂纹全部焊好后再焊接掉块和主体。为了保证一次成功，焊前专门作了模拟试验，证明栽丝法比不栽丝强度及可靠性高得多，不栽丝经不起吊装而断裂。断块尺寸为 2 500 mm × 605 mm × 115 mm，用碳弧气刨直流反接将断块裂面开 60°U 形坡口，厚处两面开 U 形坡口，磨光机打磨光洁，主体和断块相对应的坡口面都进行栽丝，M8 钢质不镀锌螺丝，间距 30 mm、深度 30 ~ 40 mm 不等、交叉花栽，拧紧锯断，然后在表面堆焊过渡层，制造坚固易焊的坡口面，为形成高强度焊接接头打好基础，这是非常重要的。断块与卡盘主体组对准确、放置稳固、两端点固，从坡口一端开始焊接连接缝，第一层只焊一段即焊第二层，第二层比第一层短就开始焊第三层……，焊缝在坡口内保持一定的梯度，逐步焊满，逐步前进，直至全部焊满，这种焊法先焊部位不易开裂，横向有一定的收缩自由，应力较小。全部焊好后进行起吊、翻转试验，用卡盘自重试验焊接接头强度性能，通过了则是一种非破坏性试验。结果顺利通过，使用情况良好，至今已近 30 年。此例说明，特大型厚壁铸铁精密机械设备遭受严重破裂损坏是可以通过焊接修复的，成功的前提是对铸铁焊接有真



(a) 焊接修复后全貌



(b) 背面铸焊加固结构

图 4.2-13　剪板机机身断裂的焊接及铸—焊加固结构



正的理解，才能正确选择焊接方法、制订正确的焊接方案。就此例而言，局部热焊虽可消除白口但却增大热应力，局部温度越高热应力越大，热应力裂纹不可避免；如整体热焊，45 t重的卡盘怎样加热到650℃，焊接过程又怎样维持温度不降低，焊工又怎样靠近施焊等，都是必须考虑的实际问题。因此电弧冷焊是唯一的选择。制订正确的异质焊条电弧冷焊工艺并严格执行，采取栽丝法、垫板法，选择恰当的焊条以及精湛的焊接技术和手法，是成功的关键。

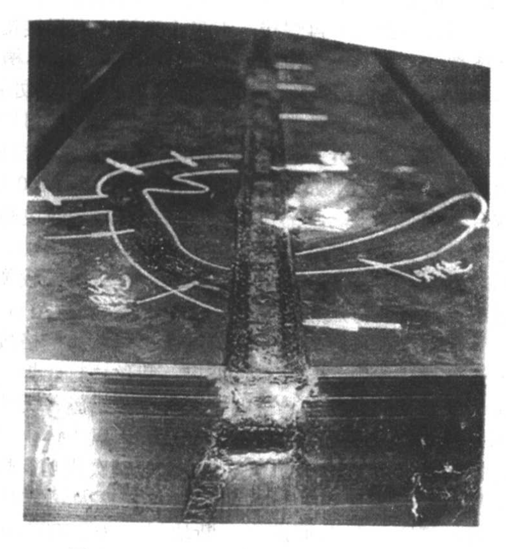


图4.2-14　16 m立车卡盘破裂的焊接修复

4.1.2　铸铁型焊缝不预热电弧焊

各种机床等灰铸铁毛坯铸件上的缺陷，如气孔、疏松、夹砂、掉角、裂纹，均适于采用铸铁型焊缝不预热电弧焊进行焊补，其优点是焊缝金属材质与母材相同、硬度相近、颜色相似、加工性好，且焊接工艺简单、生产效率较高、劳动条件较好。自推广30多年来已在很大程度上取代了热焊。但铸铁焊条性能有较大差别，不同场合、不同部位、不同缺陷适于采用的焊条种类有所不同。

（1）加工面焊补

灰铸铁焊补后，焊缝、熔合区、淬硬区硬度≥280HB时机械加工很困难，发生打刀、扛刀（即刀被硬处抬起）现象并伴随着噪声；焊缝硬度虽然不高，但熔合区白口厚度≥0.15～0.20 mm也会感到加工困难；如果硬度在250HB以下且熔合区没有明显白口，一般可以顺利加工。铸铁型焊缝本身是有许多石墨的铸铁，且与母材硬度差值小，其加工性明显优于任何异质焊缝，包括镍基焊缝。适于不预热电弧焊工艺的焊条首推灰铸铁芯焊条铸248，当缺陷≥$(8/cm^2)\times(0.7/cm)$、焊接工艺正确，焊缝硬度一般不大于210HB、熔合区硬度不大于230～250HB，通常不大于230HB，熔合区基本没有白口，有时个别区段有少量断续极薄的白口（<0.1 mm厚），多数情况完全没有白口。焊接工艺特点是大焊接输入热量，即大电流（450～500 A）慢焊速、往复运条连续焊、焊缝加高高出母材5 mm以上，充分利用电弧热量延长焊缝、熔合区高温停留时间，减慢冷却速度，相当于造成一个小局部热焊。这对于普通加工面足够了，但对于滑动配合面的技术要求还不能充分满足：熔合区硬度升高影响加工精度，形成稍高的凸起，影响配合面相互滑动的工作状况。采用围筑待焊坡口和更严格的不预焊工艺可以使熔合区硬度进一步下降至与母材基本相同，从而完全满足导轨等滑动面的技术要求。

铸铁型焊缝不预热电弧焊与热焊及局部热焊相比还有一个很大的优点是变形小，精加工之前还可应用，因此可以挽救许多加工过程中出现缺陷的半成品铸件，其价值比毛坯件高得多。

采用灰铸铁芯焊条铸248不预热焊时因焊缝是灰铸铁，塑性差，因此抗热应力裂纹能力较差，在刚度较大部位容易产生裂纹，这是不如整体或大部热焊的方面。但比小范围局部热焊热应力小，裂纹可能性较小。大中型机床导轨端部300 mm以内一般不易产生裂纹；中部刚性较大部位的较小缺陷也不易产生裂纹。较大缺陷防止裂纹的方法：分块施焊，先中后边，每块冷却后再焊另一块；长焊缝分段焊，先焊的段较长，之间留连接缝，待先焊段冷却后再连接，这样可大大减小热应力，减小开裂的几率。此方法1975年首次采用，效果良好。有的裂纹在结构有利的情况下可以采用加热减应区法焊接以防止开裂。为了提高铸铁型焊缝不预热焊时的抗裂性，采用高球化稳定性低白口倾向的通用铸铁焊条取得了很好的效果，实现了预想的目的，尤其是对于高强度灰铸铁，效果更好，但对于低强度灰铸铁因焊缝强度高，效果较差，母材易裂。由于焊缝为铁素体而石墨形状近于球状，焊缝$\sigma_b>400$ MPa并有一定的塑性，冷却过程中发生了塑性变形而减小了应力。焊灰铸铁时第一、二层近于球化，第二至三层已球化，对于15 mm厚的母材连续多层焊15 g焊缝金属即多半根ϕ4 mm焊条，焊缝金属及熔合区硬度都在200HB左右，加工性好。这种焊条命名为铸268。在完全相同的焊接工艺条件下，钢芯石墨化铸铁焊条铸208焊缝硬度高达400～600HB，即使焊前400～600℃预热，焊后仍然难以加工，熔合区白口厚0.5～1.0 mm，经600℃保温12 h白口消失，可以加工。因此一般的铸208焊条不宜用于不预热焊工艺，但对于断裂的小截面灰铸铁件的焊接还是可以的。

下面介绍一些典型实例。

例1　刨床立柱铸造缺陷（图4.2-15），长170 mm、宽60 mm、深40 mm，清理、修整坡口后用浇包耐火泥造型并烘干，距坡口边缘5～8 mm。用两把焊钳同时连续施焊，一次焊成，焊缝高出母材5 mm，焊后草包覆盖。熔合良好，未裂。焊缝硬度195～205HB，熔合区221～223HB。

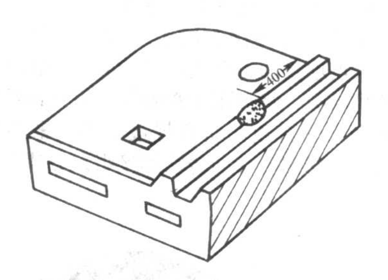


图4.2-15　刨床立柱导轨铸造缺陷

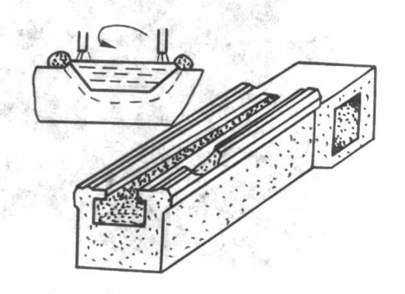


图4.2-16　C620车床床身导轨面缺陷

例2　C620车床床身导轨面缺陷（图4.2-16），用机械



法开坡口，侧壁45°，坡口尺寸：长150 mm、深60 mm。用银片石墨和4%桃胶清水调和造型，石墨条距坡口边缘约5 mm，在坡口中间用石墨隔成两部分，石墨用桃胶水调和后不必烘干，焊接时不会被熔化，能防止熔池过大、母材熔化过多。采用 ϕ8 mm铸248焊条、500 A电流，开始长弧，待底部铁液化开后改为中弧，往复运条连续施焊，提高熔池温度，但铁液白亮沸腾时应暂停降温，颜色变红再继续施焊。快到母材平面时注意控制温度不要过高，防止母材熔化过多、熔池向外扩张；高过母材后继续施焊，使电弧的强大热量通过高出的焊缝熔池液体传给熔合区，延长1 200～800℃高温停留时间并减慢冷却速度，焊缝高出铸件表面6～8 mm停止。完全冷却后清除坡口内石墨，修整焊缝连接端，然后用同样方法焊补坡口内另一段。硬度测试：母材（HT200）182HB，熔合区、热影响区182HB，焊缝173～178HB，无裂纹等任何缺陷。同样方法焊补C620车床大拖板中部缺陷，母材HT200硬度180HB左右，焊缝硬度170～180HB，熔合区、热影响均为180HB左右，熔合区完全没有白口。生产应用都能达到上述数据，说明是完全可行的、成功的。

例3　CW61100车床床身重7.5 t、长7.7 m，已加工，仅剩0.5 mm精加工余量，在床面中部发现两条长400 mm、顺序排列相距很近的裂纹。此例要求焊补区无白口、硬度与母材相近、颜色相似、不得变形，铸铁型焊缝不预热焊是唯一选择。但刚度如此之大，焊缝又长，而灰铸铁芯石墨化药皮铸铁焊条（机械生产铸248）尚处于试制阶段（1975年），抗裂性还较差，估计产生裂纹是最难解决的问题。为此研究试用分段焊解决。用机械加工方法开坡口，宽30 mm、深12 mm、两侧壁呈60°。坡口外5 mm石墨造型。每400 mm长坡口内分为7段，中间布置三段长80 mm焊缝，两端坡口内亦用石墨隔断。每一段均用铸248大电流、往复运条连续施焊，由于坡口小，应用较长电弧，连续性强，以提高局部温度，焊缝高出床身表面6 mm停焊。完全冷却后再焊另一长段，三长段焊好、冷却后，清除坡口内石墨，修整两端接头处，再逐段焊另四段较短（约40 mm长）焊缝。再用同样方法焊补另一坡口。结果在400 mm长的焊缝上只产生了一条短横向裂纹，铲去后用纯镍焊条焊补。加工性能良好，精度达到要求，没有白口，整个床面未发生变形，由于已精加工，不能再测硬度。从加工声音、精度、颜色，可以判断焊补区硬度不高且均匀。

例4　10 m^3 真空过滤机填料盒直径1 060 mm，材质HT200，壁厚23～40 mm，侧壁内表面疏松，夹砂面积190 mm×70 mm、深15～30 mm。采用 ϕ5 mm钢芯石墨球化通用铸铁焊条铸268不预热逐段多层连续焊，未产生裂纹。立车加工，焊缝易加工，但热影响区宽且硬度升高，加工有噪音。熔合区个别部位有少量很薄的白口。此例中热影响加宽的原因是：应用初期对铸268焊条性能不够了解，沿用了铸248的焊接工艺，采用了偏大的电流（约280 A），连续性过强而铸铁是中等壁厚，故增大了热影响区。由于铸268是低白口倾向高球化稳定性焊条，焊接电流采用中等大小电流（ϕ5 mm 180～250 A、ϕ4 mm 100～140 A）即可。例如柴油机汽缸体加工面上的气孔、夹砂，焊前机械法清除并开45°坡口，尺寸大于20 mm×20 mm×10 mm，电流不要过大，勿使母材过多熔化：ϕ4 mm焊条100～120 A电流连续施焊高出母材3～4 mm，焊后可以进行刨、铣、钻、锉，硬度约为200～220HB。

（2）非加工面焊补

1）已经断裂、断面较小的铸铁件焊接修复。由于焊缝可以自由胀缩，热应力很小，用铸248、铸268、铸208都可以焊接并取得满意的结果。如牛头刨拔叉断裂、拖拉机牵引鼻断裂，先将断裂处对好、点固，电弧割坡口，在一侧先焊二层，再在另一侧电弧清焊根、焊坡口的一半，再焊另一侧……，两侧轮流施焊至焊满。

2）煤气炉盖直径约3 m、高约0.6 m，壁厚约40 mm，材质为HT150。从底部圆面向上产生一条长约600 mm裂纹。先在裂纹端部钻 ϕ10 mm止裂孔，将裂纹裂隙加大，在裂纹中部和下部塞焊条头，下部间隙达5 mm，以备焊缝收缩时减小应力。用结422焊条从外侧割坡口，呈U形，留8～10 mm钝边。用灰铸铁芯铸铁焊条铸248交流施焊，将煤气炉盖斜放，一端着地，裂纹端抬高垫稳。从止裂端开始焊接，分段一次填满坡口，逐渐前进，连续施焊。随着先焊焊缝冷却收缩，裂隙逐渐变小，中部塞的焊条头被夹紧至无法取出，快焊到中部时焊条头已被压扁约为1 mm；直边部分接近立向下焊，熔池铁液易流失，稍减小电流和焊接连续性并注意焊条角度指向上，顺利焊到了底部圆面上。底部裂隙夹的 ϕ5 mm焊芯也被压扁至接近于零。预留间隙大大减小了横向应力。焊后没有产生任何裂纹及缺陷，背面虽有8 mm钝边，也基本焊透。这是利用裂隙减小应力的典型实例，堪称杰作。连续5 h完成。

3）中等厚度灰铸铁件非穿透缺陷的焊补。如大中型电机端盖（图4.2-17）、齿轮箱、内燃机车增压器出气壳（铬钼合金铸铁，图4.2-18）之类的灰铸铁及合金铸铁铸件，厚度大部为中等厚度10～30 mm，表面常产生气孔、夹砂、疏松之类非穿透性缺陷，多在非加面上。

采用灰铸铁芯焊条铸248及钢芯石墨球化通用铸铁焊条都可取得很好的效果。尤其是后者铸268，其第一、二层焊缝石墨形状已改善，有一定的塑性，二、三层已球化。同时因采用较小电流，ϕ4 mm电流100～120 A，减小了热应力，对防止热应力裂纹创造了有利条件，这是灰铸铁芯焊条铸248所不及的。这种焊补区硬度不高，如>20 mm×20 mm×10 mm仅200～220HB，强度较高，无微裂纹，是优质焊补区，但连续2～3层焊接。这种工艺热影响区不易淬硬。

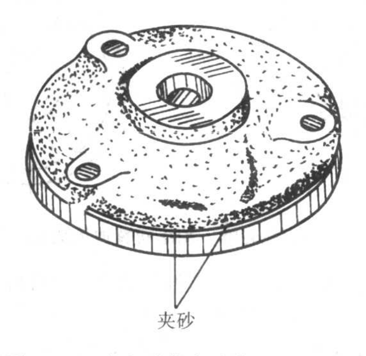


图4.2-17　电机端盖夹砂铸268不预热焊



图4.2-18　内燃机车增压器出气壳气孔铸268不预热焊

4.2　灰铸铁的气焊

4.2.1　灰铸铁热焊气焊

汽车、拖拉机灰铸铁件铸造毛坯有各种缺陷者比例很大，因此往往将热焊气焊作为一道生产工序在专门设立的



焊补车间进行焊补。这些铸件尺寸、质量、壁厚都比较小，缺陷多数是气孔、渣孔、砂眼，也比较小，适于气焊焊补。

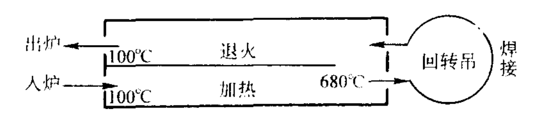


图 4.2-19　汽车拖拉机铸铁件热焊示意图

铸造毛坯本身是存在铸造应力的，热焊气焊过程和铸造毛坯消除应力退火热处理结合，作为同一工序完成，焊补之后就不必再行热处理，从而节约能源。其过程如图 4.2-19 所示，从 100℃开始缓慢升温，600～680℃出炉气焊焊补，焊后立即入退火炉消除应力。这样对于降低废品率，节约能源是很有利的。

单件焊补时往往把退火温度提高到 700℃，保持十几分钟，然后随炉冷却，或严密复盖保温在静止空气中冷却。

4.2.2　加热减应区法气焊

加热减应区法气焊原理见 3.1.2。

下面介绍一些典型实例。

例 1　皮带轮轮幅、轮缘断裂，如图 4.2-20 所示。轮幅断裂时加热轮缘阴影区，较小的皮带轮控制间隙张开量 1～1.5 mm，幅条粗则间隙张开量应加大，大皮带轮可加大到 4～5 mm。轮缘断裂时减应区为幅条，如图中阴影区，但与轮缘相对应的轮毂也可作为减应区。气焊火焰加热阴影区至裂隙达到要求的张开量时，立即加热断裂处并进行焊接，同时要间断加热阴影区尽量保持其温度不变，直至焊接完断裂处，再将阴影区加热到 700℃左右。减应区与焊缝同时冷却。

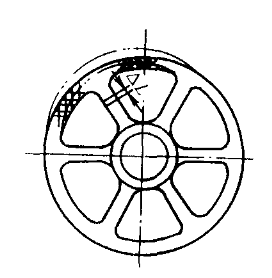
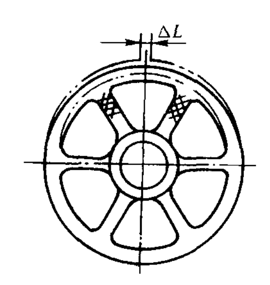
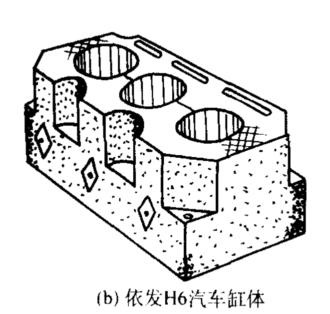



图 4.2-20　皮带轮轮幅、轮缘断裂加热减应区法气焊

例 2　拖拉机缸体孔间裂纹、汽车汽缸体缸孔间裂纹，如图 4.2-21 所示。减应区位于图中阴影处，气焊火焰加热阴影区，裂隙张开至 1.5 mm，开始焊接裂纹，但要间断加热阴影区保持温度不变。



(a) 拖拉机缸体



(b) 依发H6汽车缸体

图 4.2-21　汽车、拖拉机气缸体缸孔间裂纹加热减应区法气焊

例 3　六缸汽缸体缸孔间开裂，如 1、2 缸之间开裂，气焊火焰加热缸体平面一端及 2、3 缸之间，外端约 650℃，2、3 孔间约 400℃。缸体热胀情况如图 4.2-22 所示。立即进行焊接，焊接过程中保持上述温度和热胀变形，焊后同时收缩；如果裂纹在 2、3 缸之间，应从一端加热至 3、4 缸之间，1、2 缸间 650℃，其余 400℃；如果缸孔之间都裂了，焊前只加热缸体平面一端，然后顺序焊接缸间裂纹，最后将缸体末端平面加热到 650℃。

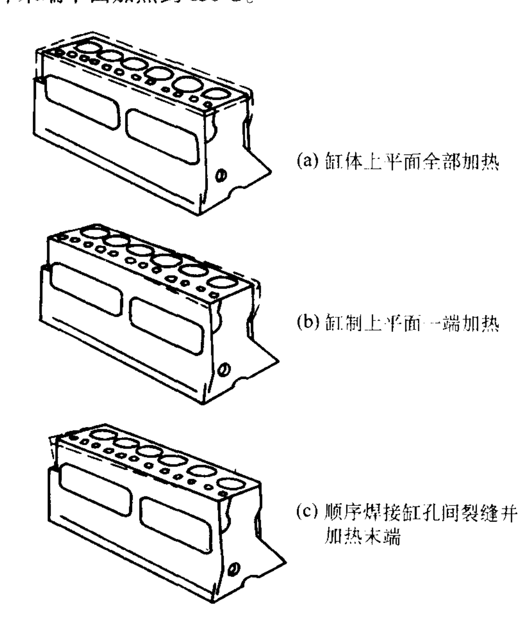


图 4.2-22　汽缸体上平面加热、焊接时缸体膨胀情况示意图

例 4　汽车发动机缸体上平面进排气孔、水孔一侧有多处缺陷，如图 4.2-23 所示。用两把焊炬，一把从一端向另一端顺序焊接，另一把加热另一侧及中部平面。为了提高焊速，焊前先清理缺陷、内部水垢并开好坡口。焊后自然冷却。半小时即可焊完，成功率十分高，效果很好。

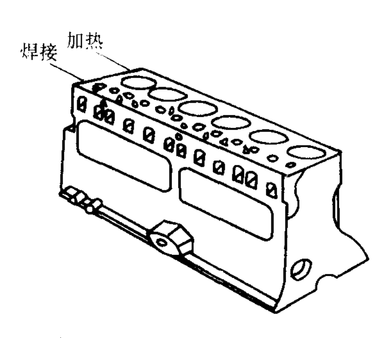


图 4.2-23　缸体上平面多处分布缺陷的加热减应区气焊

例 5　变速箱筋板断裂，加热减应区如图 4.2-24 阴影所示。

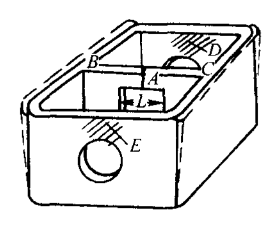


图 4.2-24　变速箱筋板断裂

4.2.3　不预热气焊

当缺陷处在边角处，或焊接时焊缝可以自由胀缩，不会因热应力过大而产生裂纹，就可以采用不预热焊。

下面介绍一些典型实例。

例 1　水泥球磨机大型传动齿轮直径 2 m，使用中掉齿。



采用不预热气焊、堆焊造齿，注意底部温度要足够，无气孔夹渣，造齿时注意尺寸形状。修复后使用效果良好。

例 2 柴油机缸体下部断裂，如图 4.2-25 所示。采用不预热气焊，焊前将缸体与下曲轴箱用螺栓紧固定位。先焊裂纹 1，裂纹 2、3 均张开约 2 mm，立即焊裂纹 2，同时间断给裂纹 1 补充加热，焊完裂纹 2 后仍加热裂纹 1 使裂纹 3 间隙 2 mm，立即焊裂纹 3。自然冷却。

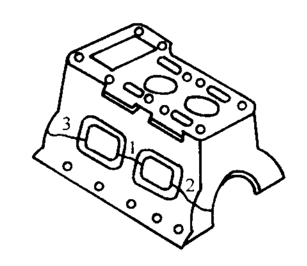


图 4.2-25 2110 型柴油机缸体下部断裂不预热气焊

4.3 灰铸铁的火焰钎焊

铸铁钎焊通常采用气焊火焰钎焊。钎焊时母材不熔化，故不会产生白口，切削加工性好；钎料常用铜合金及其他有色金属，钎缝塑性较好，容易避免裂纹；钎焊除适于补焊一般缺陷外，更适于补焊面积较大、较浅的缺陷加工面及磨损面；长期经受高温、腐蚀，或石墨片多而粗大的铸铁，熔焊时不易熔合，对焊接造成很大的困难并严重影响焊接接头强度、密封性，钎焊却有良好的适应性，可以容易地进行钎焊并获得良好的钎焊质量。

铸铁钎焊可以采用许多种钎料。从铸铁焊接性特点来看，强度较高、钎焊温度稍低、颜色差别小的硬钎焊钎料是较好的，银基钎料相当理想：BAg40CuZnSnNi 固、液相线为 634℃和 640℃，远低于铸铁熔点及相变点，钎焊温度低，接头抗拉强度高而屈服点不高，这正是防止焊接热应力裂纹最有利的条件，且不会产生白口及淬硬组织，钎料 σ_b 达 386 MPa。实践表明钎焊灰铸铁效果非常好。但含银达 40%，限制了应用。铸铁钎焊时常用的是黄铜钎料，见表 4.2-6。

表 4.2-6 铸铁钎焊铜锌钎料成分（质量分数）及熔化温度 %

牌号（国标）	Cu	Sn	Si	Fe	Mn	Ni	Zn	固相线/℃	液相线/℃
BCu54Zn	53 ~ 55	—	—	—			余量	885	890
H62（非国标）	60.5 ~ 63.5	—	—	—			余量	900	905
BCu60ZnSu - R	59 ~ 61	0.8 ~ 1.2	0.15 ~ 0.35	—			余量	890	905
BCu48ZnNi - R	46 ~ 50	—	0.05 ~ 0.25	—		9 ~ 11	余量	921	935
BCu58ZnMn	57 ~ 59	—	—	0.15	3.7 ~ 4.3		余量	880	909
BCu62ZnNiMnSi - R	61 ~ 63	0.1	0.1 ~ 0.3	—	0.1 ~ 0.3	0.3 ~ 0.5	余量	853	870

BCu54Zn（原 HL103）钎料 σ_b254 MPa，δ 约 5%，与铸铁结合强度不高，接头 σ_b 小于钎料 σ_b，硬度 48 ~ 60HB，不宜焊补齿面、键槽。黄铜钎料中加硅，钎焊时在液体钎料表面生成 SiO_2 薄膜，可减少锌的蒸发。铜锌钎料的主要缺点：一是熔点高，容易引起较大的热应力且热影响区易淬硬；二是接头 σ_b 较低，仅接近 HT150；三是颜色相差大。表中所列 BCu62ZnNiMnSi-R 固相线 853℃、液相线 870℃是其中熔化温度最低的。BCu58ZnMn 含锰较多，熔点不高，颜色较好；BCu48ZnNi-R 含镍高，颜色白，故称镍白铜。含锰、镍较多的钎料钎焊时扩散作用较强，可提高润湿性，提高钎料及钎焊铸铁接头强度。但 BCu48ZnNi－R 熔化温度较其他铜锌钎料提高 30 ~ 60℃，为 921 ~ 935℃。Cu50Zn36Mn9Ni3.5Sn0.5Al0.4 钎焊 HT200 接头 σ_b205 MPa；HL－D2 为 Cu55Zn35Mn8 余 2，熔点 830 ~ 850℃，钎焊温度应大于 850℃。

钎焊时必须使用钎剂，以便清除坡口表面及钎料上的氧化物，避免钎焊过程中的氧化，改善液态钎料对铸铁的润湿作用。铸铁钎剂主要由硼酸（H_3BO_3）及脱水硼砂（$Na_2B_4O_7$）组成，加热到高温时均分解出硼酐（B_2O_3），硼酐不仅熔点低，而且能与 Fe、Cu、Zn 等的金属氧化物复合成低熔点硼酸盐，起到去除氧化物的作用，有利于钎焊的进行。铸铁钎焊钎剂牌号及组成见表 4.2-7。

表 4.2-7 铸铁钎焊钎剂牌号及组成（质量分数） %

牌号（序号）＼组成	$Na_2B_4O_7$	H_3BO_3	$AlPO_4$	NaCl
CJ301	16.5 ~ 18.5	76 ~ 79	4 ~ 5.5	
1	100			
2	50	50		
3	70	10		20

铸铁钎焊工艺：

焊前对焊件的清理要求很高，但只要清理干净，即使油浸的铸铁件也可获得良好钎焊结果；经长期高温或腐蚀已变质的铸铁件也可采用钎焊。焊前用汽油等清洗焊补区油污，裂纹两端钻止裂孔，坡口深度应在厚度的 4/5 以上，坡口内必须露出金属光泽，坡口附近亦应清理。

当坡口加热时用氧化焰将坡口表面石墨烧去可提高钎焊强度，钎焊过程中保持氧化焰，但氧气比例不要过大，熔池表面形成氧化锌以及 SiO_2 薄膜，减少熔池内锌的蒸发、氧化，防止产生气孔。钎焊时还须防止温度过高，火焰不往复运动，加热部位应少，填加焊丝要快，焰心与熔池距离较一般气焊时大一些。

加热过程要准确判断温度，温度不足则钎料熔滴成球状，母材不润湿、温度过高则钎料中锌蒸发熔滴冒烟，这两种情况钎料与母材均结合不好。坡口边缘红热状态时均匀地撒上钎剂，用加热的钎料末端涂抹坡口，如发黏不润湿坡口则说明尚未到钎焊温度，如立即熔化铺展润湿坡口则说明已达到钎焊温度。钎焊温度取决于钎料熔化温度，应稍高于熔化温度的液相线。达到钎焊温度时用钎料涂抹坡口铺底，然后填满。为了减小应力，也应采用分段焊，每段长度以 80 mm 为宜，第一段坡口填满后冷却到 300℃以下再焊第二段，如此类推，注意段间衔接要好。钎焊温度低于钎料熔化温度，熔化钎料滴状钎焊的操作法不可取。

4.4 灰铸铁的火焰粉末喷焊

氧-乙炔火焰喷焊应用较为普遍，采用自熔性合金，喷焊熔化过程中能还原自身及基材的氧化膜，形成低熔点硼硅酸盐覆盖于表面，防止合金氧化并改善润湿，形成冶金结合，强度大于 340 MPa。喷焊修复铸铁时采用一步法，将经过预处理的工件表面预热到 250 ~ 300℃，喷涂一层厚约

0.1~0.2 mm的粉末，防止表面氧化，然后用火焰加热使之局部"发汗"，并送粉到一定厚度，再加热熔融至出现"镜面"，边喷边熔直至达到要求的厚度。

灰铸铁火焰粉末喷焊用于铸铁件机械加工时出现的小缺陷及机床使用中产生的划伤、碰伤等。铸铁的火焰粉末喷焊实质是表面钎堆焊，常采用SPH-2/h型粉末喷枪，其送粉量为2 kg/h。常采用F103粉末，其化学成分（质量分数,%）：C≤0.15，Cr8.0~12.0，Si2.5~4.5，B1.3~1.7，Fe≤8，Ni余量。喷焊层硬度20~30HRC，喷焊HT200接头σ_b≥200 MPa。专用于喷焊铸铁的低硬度自熔粉末牌号、成分及硬度见表4.2-8。

表4.2-8　较低硬度自熔合金粉末成分与硬度

牌号	合金粉末成分（质量分数）/%								硬度HRC
	C	Si	B	Cr	Cu	Fe	Ni	O	
N15	≤0.1	1.6~2.4	<1.4		19~21	<1	余量	0.06	10~20
N25	≤0.1	2.5~3.5	1.0~2.0			<1	余量	0.06	20~30
N35	≤0.2	2.5~3.5	2.0~3.0	8~12		≤3	余量	0.06	30~40

喷焊工艺：待喷面清理干净至露出金属光泽，转角处应圆弧过渡；旧件修复时先用化学溶剂如三氯乙烯清洗干净油污，然后用角向磨光机、磨头打磨，划伤、凹痕开成U形坡口。坡口预热至300℃左右开始预喷粉，厚度0.1~0.2 mm，局部发汗，送粉，熔融至刚出现镜面（约1 100℃），再送粉，至要求的厚度。火焰与喷焊面避免垂直并调节喷嘴至工件的距离，防止温度过高造成工件过热及喷焊层流坠。喷焊粉末熔点一般≤1 050℃。喷焊工艺必须按照异质焊缝电弧冷焊工艺进行，长缺陷分段，宽缺陷分块，每段长度小于等于30 mm，每段一次喷满，冷却过程中锤击喷焊层消除应力，冷却至40℃以下再喷焊，即断续焊；很长的缺陷可以分成几段分别进行"分散焊"，以减小热应力。

5　球墨铸铁的焊接

5.1　球墨铸铁焊接性

1）球墨铸铁热应力裂纹敏感性较小，且与其塑性高低密切相关。球墨铸铁力学性能好，除奥-贝球墨铸铁具有优异的综合力学性能外，珠光体球墨铸铁、铁素体球墨铸铁的强度与塑性呈高低对应组合关系。影响热应力裂纹敏感性的力学性能主要是塑性，即伸长率、断面收缩率及屈服点与抗拉强度之比，通常主要由伸长率判断。《铸铁焊补》1978年所作的前瞻性研究在一系列试验和实践中得到证实：高塑性铁素体球墨铸铁、小直径薄壁管制造铸-焊复合结构，采用高钒焊条、镍铁合金焊条手工电弧焊、或者采用高钒药芯焊丝、镍铁合金药芯及实芯焊丝CO_2气体保护焊，在球墨铸铁管之间或球墨铸铁与低碳钢管之间焊对接焊缝或搭接缝，不采用短段焊、断续焊、锤击消应力的电弧冷焊工艺，而采用较小电流连续焊工艺，不产生热应力裂纹；1982年高球化稳定性低白口倾向的通用铸铁焊条铸268研制成功之初的生产实验中，在不预热的情况下，采用与焊接低碳钢相似的摆动运条连续焊工艺，焊补厚壁铸态球墨铸铁毛坯上的长缺陷，焊缝长300多mm，冷却后放置几天及热处理后均未产生裂纹；以后的长期生产中对结构合适的球墨铸铁都采用了这种焊接工艺，不预热情况下焊缝长度达到了500 mm，最长超过1 000 mm。这不仅说明焊缝金属的塑性和抗热应力裂纹能力，同时也说明球墨铸铁母材的抗热应力裂纹能力。铸态球墨铸铁塑性不如退火后的铁素体球墨铸铁，但一般δ可达5%左右或更高，因此具备并表现出了一定的抗热应力裂纹能力。

2）球化元素一般均增大白口倾向，因此熔合区白口倾向较灰铸铁大。在球墨铸铁型焊缝中，焊缝充分球化时其白口倾向迅速增大，焊缝中渗碳体含量迅速增加，引起焊缝塑性下降，裂纹倾向骤然加大并远远超过无渗碳体的片状石墨焊缝。另一方面，所有的球化元素在电弧焊的高温下都易氧化、蒸发，难以保证焊缝球化的最低残留含量，导致球化不稳定，这不仅使焊缝力学性能达不到球墨铸铁标准，也降低焊缝抗热应力裂纹能力。

3）异质（非铸铁型）焊缝熔合区特性：钢焊条焊球墨铸铁时，由于球墨铸铁含碳量较高，通常$w_C>3.5\%$，而普通灰铸铁为3.0%左右。半熔化区的概念十分明确，仅指熔焊时半熔化或部分熔化的晶粒及其之间的液体带，而完全熔化的区域不属于半熔化区。半熔化区虽然也存在元素的扩散，但其成分与母材基本相同。球墨铸铁半熔化区含碳量通常也大于3.5%，一般比灰铸铁半熔化区含碳量高0.5%以上，而未混合区符合铸铁成分的含碳量范围是2.0%~3.5%，也比灰铸铁的2.0%~3.0%大。钢焊条焊接球墨铸铁，熔合区白口约0.3 mm厚，较灰铸铁（0.2 mm）时大。

高钒钢焊条或高钒药芯焊丝焊接球墨铸铁时与钢焊缝上述情况相似，不同处在于未混合区中的碳在活度梯度推动下迅速向焊缝方向扩散，并与钒结合成碳化钒，与钢焊缝未混合区相比其含碳量下降，且能与铁形成Fe_3C的自由碳减少，因此其熔合区白口厚度稍减小，约为0.23~0.29 mm。与熔合区白口相邻的焊缝底部黑带区是钒合金钢上分布的碳化钒颗粒，也应属未混合区一部分，其显微硬度为746Hm。由于其十分狭窄，其余力学性能的测定是很困难的。根据其成分及组织特点可以肯定属于弥散硬化及强化，强化程度远高于高钒铁素体V_4C_3弥散强化的焊缝金属。由接头拉伸试验断裂在铁素体球墨铸铁母材或热影响区可断定其有较高的强度性能，至少高于铁素体球墨铸铁。由于其弥散硬化相是粒状碳化钒，其脆化程度小于熔合区白口（莱氏体）组织。

镍铁合金焊条焊接球墨铸铁时，以熔敷金属w_{Ni}55%计，考虑到母材的熔入，在较小电流情况下第一层焊缝金属w_{Ni}约40%，已经不属镍基合金。国内厂家生产的镍基焊条都是石墨化型药皮，但石墨比例不同，因而熔敷金属含碳量亦有差别，一般w_C1%~2%。以1.5%计，第一层焊缝w_C约为2%或接近2%。因此镍铁合金焊条焊球墨铸铁时第一层焊缝依含碳量高低不同而成为高镍合金铸铁或高镍合金钢，但其组织和性能并无明显差别，都有石墨析出而没有渗碳体。这说明这种成分的合金石墨化能力很强，远超过任何一种铸铁。虽然含碳量低于铸铁母材，但碳的活度（即有效浓度）却高于铸铁母材，因此未混合区中的碳不是向焊缝而是向母材半熔化区侧扩散，即上坡扩散，未混合区被压缩，$w_{Ni}<15\%$区与半熔化区一起成为白口，其厚度约各占50%。焊缝含镍量提高将进一步压缩未混合区，直至熔合区白口仅由半熔化区构成，呈断续状，平均0.05 mm厚，减至镍（w_{Ni}55%）铁合金焊条熔合区白口厚度的50%。白口铁是片状渗碳体+珠光体，虽然渗碳体片状粗大致白口铸铁脆硬，但并不等于强度低。珠光体也是由片状渗碳体而强化，珠光体球墨铸铁σ_b≥700 MPa。接头抗拉试验也说明熔合区白口具有相当高的强度，只是塑性、韧性大幅度降低。镍铁合金本身固熔强化很弱、强度并不太高，采用碳化物元素弥散强



化的方法可以大大强化焊缝，但 w_{Ni} 15%～30%的焊缝底部如果也称为未混合区，此区强化程度显著降低，成为接头强度薄弱环节。

4）球墨铸铁热影响性能：球墨铸铁具有不同的基体，不同基体组织含碳量不同，因而淬硬程度和宽度也不同。球墨铸铁珠光体含碳量 w_C 一般在0.5%以上，容易转变为奥氏体且奥氏体区温度范围宽，达280℃左右，石墨中的碳还会向奥氏体中扩散，所以焊前不预热时在较快的冷却速度下淬硬程度较高，宽度较大。其最高硬度可达800HV以上，电弧冷焊时淬硬宽度可达1.5 mm左右。采用退火焊道可大幅度降低最高硬度。采用球墨铸铁型焊缝不预热焊工艺由于焊接热循环与电弧冷焊不同，往往增加淬硬区宽度，提高基体含碳量但又减慢冷却速度，其淬硬程度及宽度取决于具体焊接工艺，但一般淬硬程度较电弧冷焊低。但是异质焊条电弧冷焊前预热300～400℃可大幅度降低淬硬程度，甚至<280HV。铁素体球墨铸铁因铁素体含碳量很低，在电弧冷焊快速加热时石墨中的碳来不及扩散到基体中，只有加热到相当高的温度以上的区域才使基体含有足够碳，完成奥氏体转变。其淬硬区的宽度比珠光体球墨铸铁大为减小；铸态铁素体球墨铸铁成分特点是含硅高而含锰低，其奥氏体化完成温度高达1 050℃，较珠光体球墨铸铁高出230℃之多，淬硬区仅0.04 mm。石墨球径越大，数量越少，碳向基体扩散越慢，甚至形成断续的、被铁素体间隔开的淬硬区，从而热影响区韧性得以提高。

5）球墨铸铁是重要的工程结构、机械零件材料，国家标准对其力学性能作了严格的规定。虽然有关国家标准未规定球墨铸铁焊接应达到的力学性能，但焊接材料生产厂家应在产品说明书、质量保证书中写明，使用者有条件时进行复验。有关手册、书籍介绍球墨铸铁焊接后的性能时，应以铸造球墨铸铁有关国家标准规定的内容进行介绍，抗拉强度和伸长率是必须保证的性能指标，不能给人以误导，硬度和组织国家标准不作规定，应注明"供参考"，相提并论也同样不符合国家标准。

球墨铸铁焊接之后使用时是整个焊接接头承受外力，焊接接头中任何一个区域构成薄弱环节都可能导致损坏或断裂，因此考察或检验焊接之后的性能不能回避接头任何一个区域，因此焊接接头力学性能试验和测定成为必作项目，按照球墨铸铁国家标准GB/T 1348—1988规定，应作拉伸性能试验检测强度和伸长率，可以检测出所有薄弱环节。例如镍铁合金焊条焊缝金属抗拉强度一般为400～500 MPa，伸长率可达10%～20%，但焊接球墨铸铁接头 σ_b350～400 MPa、δ<10%且断于焊缝，焊缝固溶强化（提高 w_{Si}）或碳化物弥散强化，或石墨球化均可使焊接接头力学性能达到 σ_b400 MPa、δ10%，难以满足多种球墨铸铁的要求。参见3.3.1。

5.2　球墨铸铁的电弧焊

5.2.1　异质（非球墨铸铁型）焊缝电弧冷焊

由于球墨铸铁有很好的力学性能，优良的铸造性能，焊接热应力裂纹敏感性较低，制造铸-焊复合结构成为可能；因力学性能好，球墨铸铁机械损坏较少，但铸造缺陷的焊补仍很重要。

（1）钢焊条、焊丝焊接

用结构钢焊条如结506焊接，即使用小电流第一层焊缝也是高碳马氏体钢，有小的热裂纹、冷裂纹，焊接球墨铸铁接头 σ_b 约190 MPa，因此不宜用结构钢焊接球墨铸铁。尽管曾有过焊接万向节叉（QT40-10）与20钢管制造汽车传动轴的先例，且通过了扭转试验和运行试验，但显然是不科学的，焊接电流稍大就会产生严重的纵、横向裂纹。

用低碳钢芯铁粉稀释型EZFe-2焊条小电流时焊缝第一层含碳量 w_C 即可降至0.5%左右，一般没有裂纹，质量较用结构钢焊条好得多，强度也较高，焊接不重要的非加工面还是较好的。熔合区白口约0.3 mm厚。

用H08Mn2Si细丝 CO_2 气体保护焊，电弧电压18～20 V，焊接过程稳定的小电流，第一层焊缝 w_C 可降至0.5%以下，熔合区白口厚度约0.1 mm，甚至断续，接头强度较高，是一种质量较好的机械化焊接方法，但坡口根部难以焊透，只宜用作打底层。焊接铁素体球墨铸铁不易产生裂纹，可以获得质量更好的焊接接头。

（2）高钒焊条及高钒药芯焊丝焊接

焊缝金属 σ_b550 MPa、σ_s340 MPa、δ28%～36%，焊接铁素体球墨铸铁接头强度与母材相当：高钒钢焊条焊接QT40-10（$\sigma_b \geq$392 MPa）接头 σ_b402～407 MPa，断于热影响区；高钒药芯焊丝焊接接头 σ_b404～448 MPa，多断于母材，少数断于热影响区；高钒药芯焊丝打底焊后进行高温退火，消除熔合区白口后再用H08Mn2SiCO_2 气体保护焊，接头 σ_b434～443 MPa，断于母材或热影响区。其熔合区硬度由退火前的666HV降到260HV，焊接接头硬度分布趋于平缓。从接头力学性能、实现机械化自动化焊接、防止热裂纹及剥离性裂纹以及经济性诸方面考虑，除加工性之外，高钒药芯焊丝优于镍铁合金焊丝。

（3）镍铁合金焊条及焊丝焊接

镍铁合金焊条抗热裂纹能力及力学性能有了较大的提高，但未混合区这一薄弱环节使珠光体球墨铸铁焊接接头抗拉强度与标准还有一定差距，只能达到铁素体球墨铸铁性能。

国外研究用直径 ϕ0.8～1.2 mm镍铁合金实芯焊丝氩气保护焊，100 A电流短路过渡，熔合区白口及热影响区很窄，加工性良好，电流加大时白口增厚。研究了铸态铁素体球墨铸铁用镍铁实芯焊丝焊接时，熔合区、热影响区冲击韧度与母材石墨球数量的关系，得出单位面积石墨球数越少，冲击韧度越高的研究结果。研究了镍铁合金药芯焊丝，熔敷效率高达6.8 kg/h，焊缝金属力学性能：自保护时 σ_b476 MPa、σ_s310 MPa、δ15.5%；CO_2 气体保护时 σ_b496 MPa、σ_s314 MPa、δ21%。焊接接头自保护及 CO_2 气体保护有相同的强度性能：σ_b455 MPa、σ_s300 MPa。药芯焊丝直径 ϕ2.4 mm，焊接电流330～380 A。由于焊接电流大，熔合区白口较厚，300℃预热也不能消除，焊接接头塑性下降明显，在只作水压试验的离心浇铸球墨铸铁管焊接上有应用。进一步研究了焊接接头韧性、塑性与预热、焊后热处理的关系，焊前预热没有影响，焊后900℃消除白口退火能明显提高韧性和塑性，使冲击韧度、弯曲角分别由2～8 J/cm^2、2°～10°提高到9～13.5 J/cm^2、31°～40°，与母材的18 J/cm^2、138°仍有较大差距。上述试验结果并不理想，没有特别的优越性。

下面所述为异质（非球墨铸铁型）焊缝电弧冷焊实例。

例1　用铁素体球墨铸铁和低碳钢管制造汽车传动轴，如图4.2-26所示。可以用4种方法焊接：一是用高钒焊条较小电流连续焊一圈，小传动轴焊一层即可，大传动轴焊第一层稍冷再焊第二层；二是采用高钒药芯焊丝，直径 ϕ1.52 mm、焊接电流120～140 A、电弧电压22～24 V，直流反接，焊速10～12 m/h，CO_2 气体流量10～12 L/min。90°V形坡口，间隙1～1.5 mm，以保证焊透；三是用高钒药芯焊丝先在球墨铸铁坡口表面堆焊过渡层后高温退火消除熔合区白口，再用H08Mn2Si焊丝 CO_2 气体保护焊接球墨铸铁万向节与钢管间的坡口；四是用H08Mn2Si细丝 CO_2 气体保护焊接规范预先堆焊球墨铸铁万向节坡口表面，再用H08Mn2Si细丝 CO_2 气体保护焊接万向节与低碳钢管间的坡口。

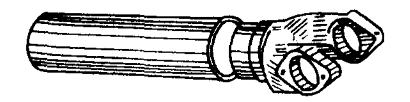


图 4.2-26 球墨铸铁-钢管汽车传动轴

例 2 大型轴流泵球墨铸铁大轴包覆不锈钢板的焊接，系引黄工程重点项目，共十套。设计采用 QT60 - 2（$\sigma_b \geqslant$ 588 MPa、$\delta \geqslant 2\%$）代替 45 锻钢制造轴流泵大轴，一端包覆 1Cr18Ni9Ti 不锈钢板，制造球墨铸铁-不锈钢铸焊复合结构，如图 4.2-27 所示。轴颈套由 10 mm 厚不锈钢热加工而成，校圆、车环缝坡口、刨纵缝坡口。大轴环缝坡口车成 U 形。装配时热校至基本贴合后用专用夹具装配，使轴颈套与轴密切贴合。用镍铁焊条塞焊并锤击消除应力，上层用不锈钢焊条塞焊。纵缝底层用镍铁焊条，电弧冷焊工艺施焊，上层用不锈钢焊条。最后焊环缝，全部采用镍铁合金焊条电弧冷焊。实践中发现，如不按非铸铁型电弧冷焊工艺施焊，环缝球墨铸铁一侧熔合区会产生严重的剥离现象。采用严格的电弧冷焊工艺完全避免了剥离。由于壁厚，球墨铸铁强度高，可以用力锤击充分消除应力，为了提高效率又减小热应力，每段用棉纱沾水冷却。时为 12 月底，在车间温度较低的情况下并未产生裂纹，并仅用 10 天完成了 10 套大型轴流泵的焊接，年底装车试验一次成功，1976 年初投入使用，运行正常。

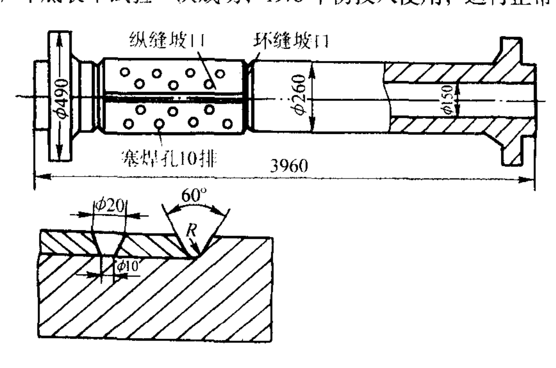


图 4.2-27 轴流泵球铁大轴包覆不锈钢板的焊接

由例 1、例 2 焊接工艺及焊接情况对比可知，球墨铸铁基体组织不同，其抗热应力裂纹能力不同，铁素体基体优于珠光体基体；壁厚增加，刚度加大，热应力裂纹倾向也加大。只有壁厚较薄的铁素体球墨铸铁刚度不大的部位，才能用异质焊条连续施焊，否则就易产生裂纹。因此一般情况下还是应采用异质焊条电弧冷焊工艺。

例 3 空气压缩机气缸体重 2 t，壁厚 30 mm，双层水冷式结构，材质为球墨铸铁，工作压力 0.6 MPa。内壁裂纹长约 100 mm。第一次采用镍铁合金局部预热焊接，因为没有采用电弧冷焊工艺防止和消除应力而局部预热又增大热应力，裂纹又在刚性很大的部位，故产生了裂纹；第二次仍采用镍铁合金焊条，改为整体预热，但因内壁温度远低于外壁温度，焊接时产生很大热应力，导致裂纹发展到 290 mm。第三次采用铸铁合金焊条、异质焊条电弧冷焊工艺焊接成功：手铲开底部圆弧的 U 形坡口，宽 25 mm、深 20 mm，尚留 10 mm 钝边。原因是工作压力较低，仅 0.6 MPa（约 6 kgf/cm^2），设计安全系数很大。焊条直径 ϕ3.2 毫米，为了熔合好，直流正接，120 A 电流，先在坡口堆焊一层过渡层，每段长 30～50 mm，用力锤击；焊连接缝时从一端开始，在已堆焊的坡口间焊较厚的连接缝，每段长 20 mm，并在坡口上收弧，防止热裂纹。第一层连接缝有一定长度时就焊第二层，将一端焊满，在坡口内形成一定斜度，逐渐向前焊满。焊接过程顺利直至焊完，进行水压试验无渗漏，长期使用正常。

例 4 20 m^3 空气压缩机由球墨铸铁制成，工作压力 1.2 MPa，使用不当在法兰处产生两条裂纹，壁厚 30～40 mm。第一次采用纯镍铸铁焊条焊接，未预热，焊缝宽 80 mm，未按异质焊缝冷焊工艺进行，产生了严重的热应力裂纹。第二次焊前用机械法将先焊的部分及裂纹全部清除，坡口侧壁上钻孔、攻丝，并用镍铁合金焊条堆焊一层。按缺陷形状、厚度，用 40 mm 厚的低碳钢板制作补板，侧壁作成 30°坡口，镶入后点固。用镍铁合金焊条直流正接，按异质焊缝电弧冷焊工艺施焊，分段长 40 mm，锤击要适当用力充分消除应力，逐步焊满逐步前进直至完全焊满坡口。水压试验无渗漏，已正常使用多年。

5.2.2 球墨铸铁型焊缝的电弧焊

同质球墨铸铁焊条的研究虽然取得了重大进展，但仍然没有一种焊条能实现真正意义上的电弧冷焊，其焊缝渗碳体含量与焊接热输入量、冷却速度密切相关，只能在一定焊接工艺条件下防止白口，还不能采用"异质焊缝电弧冷焊工艺"，最好的焊条也只能在一定结构、刚度、壁厚条件下采用不预焊工艺，对球墨铸铁件的缺陷进行焊补或对损坏的铸件进行焊接修复。但无论从焊接热过程还是焊接冶金过程来看，与电弧冷焊截然不同，仅因不预热就称之为冷焊，无论在采用焊接工艺还是适用范围上都会造成失误。焊缝石墨球化的同质铸铁焊条将来能否适用电弧冷焊工艺，还待进一步降低白口倾向，只有在厚大铸铁件上较小电流、短段焊焊缝无渗碳才有可能实现，而铸 268 焊条上述冷焊条件下仍有 25%左右的渗碳体，硬度也达 278HB。根据其性能特点研究出来的焊接工艺为：多层连续、逐段焊满、摆动运条、分块施焊。与灰铸铁焊条铸 248 大电流、大熔池不预热焊工艺并不完全相同，只采用中等焊接电流、一定的层间温度施焊，与《焊接手册》所述不同，其他球墨铸铁焊条未必能适用。根据生产经验进行归类：一般刚度的长条形浅缺陷（≤25 mm）一次横向摆动到缺陷宽度，焊至长 80～150 mm 时，回弧焊第二、三层，再向前施焊，逐段焊满，窄长坡口多根焊条连续一次焊好。这种焊接方法焊缝渗碳体很少，且以铁素体为主，有很好的塑性，不易产生裂纹，热影响区淬硬程度低、宽度窄，实际生产中焊缝长达 1 m 多也不产生裂纹，操作简单方便，成功率很高。操作工艺见图 4.2-28c。

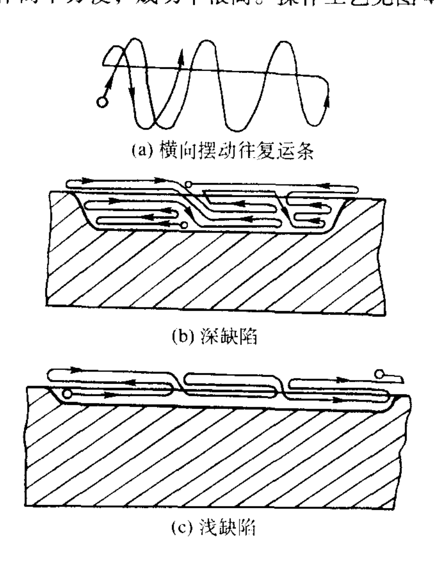
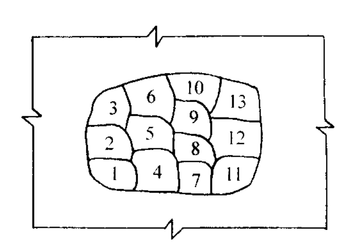


图 4.2-28 长条形缺陷逐段多层焊法

面积较大的缺陷须将缺陷分成许多小块，每块尺寸在 40 mm × 50 mm 以内，按图 4.2-29 所示顺序逐块堆焊，第一层往复运条四五次再迅速去渣，立即用同样方法焊第二层，直至堆满到与铸件表面一致并略高；再焊缝第 2、第 3

块，……，直至焊完。这种焊法既可减少甚至消除焊缝渗碳体，焊接过程中先焊的焊块能较自由收缩，减小热应力。其焊接过程符合多层连续、逐段焊满、摆动运条、分块施焊的工艺。在刚度不太大的部位、不太深的缺陷时采用不预热焊也不会产生裂纹。



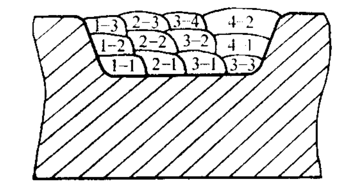


图 4.2-29 大面积缺陷逐块多层连续焊方法

刚度很大的部位一般是铸件中部，如果缺陷又深又大，采用不预热焊对焊接工艺要求很严，中间不能有稍许停顿，焊接时间又很长，须一次焊成，往往需 8 ~ 12 h 甚至更长时间，焊接成功率降低，故不如采取局部预热的方法，焊工轮流操作，有休息时间，并保证一次成功。预热温度根据缺陷大小和深度及刚度而定，在 300 ~ 600℃之间。再大的缺陷较少遇到，一般也不必再焊。所采用的工艺与上述大面积分块堆焊基本相同，但焊后应立即进行热处理，以防止裂纹并达到相应牌号球墨铸铁力学性能。

由于球墨铸铁主要用于重要工程结构和机械零件，其使用安全性关系重大，本部分内容只能介绍多数工厂检测都达到当时有关标准规定的性能并在生产中应用，适应前述焊接工艺的高球化稳定性低白口倾向通用铸铁焊条（铸 268）。现将当时各厂生产的不同牌号球墨铸铁的焊接接头力学性能检测数据汇总简介如下（序号代表不同工厂）：① σ_b 402 MPa，δ20%；②符合机标 QT400 - 10、σ_b420 ~ 430 MPa，δ11% ~ 13%；③σ_b441 ~ 451 MPa，δ11% ~ 12%；④σ_b496 MPa，δ13% ~ 14%，符合机标 QT450 - 10；⑤σ_b529 MPa，δ7% ~ 8%；符合机标 QT500 - 7；⑥σ_b647 ~ 690 MPa，δ5% ~ 6%，符合机标 QT600 - 3。焊缝无缺陷时全部断于母材，个别断于焊缝的试样断口上或有夹渣或有气孔、σ_b 无影响而 δ 下降，但仍接近或达到当时的标准，说明焊缝金属有一定的塑性储备，球形气孔影响较小、夹渣影响较大。如 QT600 - 2 焊接接头 σ_b642 MPa，δ2.0%，断于焊缝，断面有 1 mm × 3 mm 气孔；QT500 - 5接头 σ_b520 MPa，δ3.5%，断于焊缝，断面夹渣面积占 10%。焊接时应尽量避免气孔、夹渣。经上述焊条焊接的球墨铸铁件长期应用证明是安全可靠的。

20 世纪 60 年代末至 80 年代许多国家对球墨铸铁焊条进行了深入研究，公布了多项专利，采用的球化元素遍及已知的所有球化元素：轻稀土、重稀土、碱土金属元素，研制了多种钢芯、铸铁芯焊条及药芯焊丝。按能代表各国最高水准的择优介绍于下：德国 1967 ~ 1973 年纯铁焊芯球墨铸铁焊条，焊缝为超低 Mn、S、P，Ni0.35% 的球墨铸铁，退火 σ_b421 ~ 451 MPa - δ14% ~ 17%，正火无数据；要求预热大于 450℃，一般 600 ~ 700℃；1953769 号专利亦用纯铁焊芯，球化元素为 Ca 或 Sr、Ba，350℃预热。德国 Giesserei1982 年 3 月称“这类市售同质焊条热焊不能满足要求”，因而研制出“超级特别钢焊条”，属异质焊条，$\sigma_b \geq$ 353 MPa - $\delta \geq$ 10.5%。可以了解到德国同质球墨铸铁焊条既未实现不预热焊，力学性能亦未能全面达到球墨铸铁标准要求。前苏联十年内取得 7 项专利，1976 年以后均采取铝脱氧，并加入合金元素提高正火珠光体含量，以达到提高强度的目的，但降低白口倾向采用不预热焊方面无进展。乌克兰巴东电焊研究所药芯焊丝的研究代表了前苏联研究水准：采用 Mg、Ca、Ce 联合球化，非合金化球墨铸铁焊缝 σ_b539 ~ 588 MPa（δ 无数据），退火σ_b451 ~ 510 MPa - δ5% ~ 12%；600℃热焊有 20% 渗碳体。其焊缝成分为低 Mn（w_{Mn} 0.3%），低 S、P，w_C3.2% ~ 3.6%、w_{Si} 3.0% ~ 3.4%、w_{Mg} 0.015%、w_{Ca} 0.02%、w_{Ce}0.02%。为了提高正火态强度，还加入 Ni、Cu，焊缝 w_{Ni}3.0% ~ 4.0%，w_{Cu}2.2% ~ 3.0%。1979 年美国研制了铸铁芯球墨铸铁电焊条，用 Ce 等稀土作球化剂，Ni 及 Cu 合金化提高强度，但焊前须预热。唯有美国 4054777 号专利提出可以不预热焊，但须同时熔化两根不同成分的焊条。可见不预热焊接球墨铸铁是各国共同追求的目标，同时熔化二根焊条有许多不便之处，当是常规一根焊条不能实现而采取的措施。其一根焊条为 w_{Si}2.5% 的强氧化性药皮的钢焊条，另一根焊条为 w_C2.85%、w_{Si}2.5% 的石墨化焊条，焊缝金属 w_C3% ~ 4%、w_{Si} 1.8% ~ 2.8%，未公布球化元素，亦未公布力学性能。英国 1293879 号专利认为焊缝石墨球化困难，提出低碳钢焊芯、含 Ca 或 Sr、Ba 的非石墨化药皮电焊条焊球墨铸铁，焊缝性能“接近母材”，这是一种钢焊条。日本 1976 年公布的球墨铸铁焊条，其焊缝金属化学成分为 w_C3.5%、w_{Si} 4.5%、w_{Mg} 0.027%，低 S、P。用 Mg 单一球化，其白口倾向不会太低。

1984 年我国引进瑞士自动铸造生产线，其中的造型机震铁为 18 t 重球墨铸铁，圆柱状，外圆上有二处缺陷进行过焊补并经精加工，我方检验时发现，并进行了金相、硬度、超声波检查，其中较大的焊补区尺寸为 165 mm × 65 mm，经我国专家分析认定，内部采用同质球墨铸铁焊条焊补，表面用镍基焊条盖面，盖面焊缝硬度 152HB，由于内部同质焊缝在缺陷边缘焊得较高，致加工后半圈 5 ~ 6 mm 宽度外露，金相分析为亚共晶白口（渗碳体 + 球状珠光体） + 不圆整的小球状石墨（0.03 ~ 0.08 mm）及少量厚片状石墨，硬度大多为 52 ~ 56HRC，少数 30 ~ 40HRC。由此可看出其同质球墨铸铁焊条技术性能。作者参与了此项技术工作。

（1）不预热焊

中等厚度及薄壁球墨铸铁，或厚壁但刚性较小的部位，采用上述往复运条多层连续焊工艺进行不预热焊一般均能成功，但应注意有次序地焊接，焊接过程不要中断，焊接处应当避风，环境温度应达到室温（20℃）。焊后立即用硅酸铝保温棉、岩棉等保温，使表层焊缝渗碳体含量进一步减少甚至为零，对于铸态使用的球墨铸铁是有效措施。一般球墨铸铁毛坯在热处理前焊补、焊后按照相应牌号进行相应的热处理，以便达到标准规定的力学性能。中弧施焊，弧长（指药皮前端至熔池距离）大致与焊芯直径相等，不可过长，以免有益元素过分烧损影响球化。焊接电流则根据铸件壁厚在一定范围内调整，ϕ5 mm 焊条一般为 180 ~ 250 A。

下面介绍一些典型实例。

例 1 内燃机车增压器进器壳，为 QT40 - 10（$\sigma_b \geq$ 392 MPa、$\delta \geq$ 10%）球墨铸铁铸造毛坯，图 4.2-30 圆周上 300 多毫米缺肉，宽 30 多毫米，深约 15 mm。采用高球化稳定性、低白口倾向通用铸铁焊条（铸 268），ϕ5 mm 焊条焊接电流 230 A、弧长约 5 mm，按图 4.2-28c 方式横向摆动运条，每焊一段约 100 ~ 120 mm 即向回运条，再向前焊，连续施焊，高出母材，一次焊成。焊后未裂，放置几天亦未裂，进



高温退火处理亦未裂。用风铲铲平焊缝高出的部分，铲下的焊缝金属呈卷状、柔韧，车间技师认为 $\delta > 10\%$。用同样的球墨铸铁作焊接接头相同热处理后的力学性能测试，σ_b420～430 MPa、δ11%～13%，断于母材。此例为1982年5月实施，该件经加工及检验无任何缺陷，装机应用。遍查国内外资料可认定：此例为用球墨铸铁型焊条对球墨铸铁进行不预热焊接首次获得成功的范例。类似结构的球墨铸铁件，类似的缺陷很多，构成了一大类，采用不预热焊工艺都获得成功。如图4.2-31所示弯管模上的缺陷，长达500多毫米；如图4.2-32所示球墨铸铁毛坯，缺陷在上平面，较浅、较窄，其焊补方法与上述方法相同。此类缺陷特点是较窄、较浅，宜于横向摆动往复运条、多层连续焊一次完成的操作法，操作简单，与低碳钢焊接无大差别。矿车轮、天车轮外圆上的缺陷采用同样的不预热焊工艺都可获得成功。

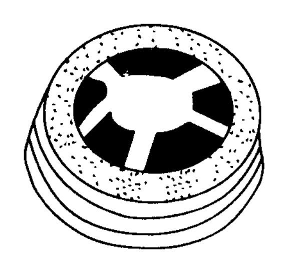


图4.2-30 内燃机车增压器外壳不预热焊 ϕ5 mm 铸268焊条230 A摆动往复连续焊

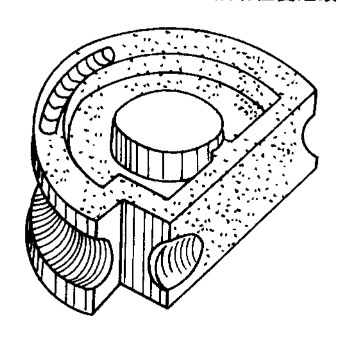


图4.2-31 弯管模上平面长500 mm缺陷不预热焊 ϕ5 mm 铸268，220 A

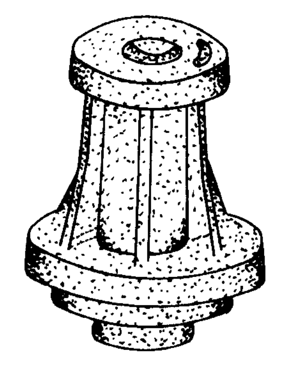


图4.2-32 不预热焊 ϕ5 mm 铸268

例2 刚度较大、缺陷长而数量多的球墨铸铁件不预热焊补。图4.2-33所示的大型门盖是一大类产品，尺寸质量不一，结构特点是其上有多条相互交叉的格状加强筋板，筋上容易产生"冷隔"缺陷。此门盖直径2 m，重1.8 t，筋上有5处冷隔缺陷，尺寸为370×30×20 mm、260×30×20 mm、130×30×20 mm、50×30×10 mm、60×50×15 mm，二处在筋上交叉。为了防止裂纹，开始曾试用高球化稳定性低白口倾向通用铸铁焊条（铸268）、异质焊缝电弧冷焊工艺进行焊补，在第一处冷焊一层，再在第二处冷焊一层，待第一处第一层冷却后再焊第二层……，在筋板交叉部位产生裂纹。用气割将焊缝割除，改用横向摆动往复运条、多层连续分段堆焊，从一端顺序焊补到另一端、一次焊满的工艺，由于刚性大，为防止裂纹，每一条焊缝焊后用小锤长时间锤击焊缝减小应力。由于这种焊缝塑性很好，锤击不会使之开裂，且硬度不高，锤击是有明显效果的。冷却及热处理后都不开裂，这种不预热焊法加锤击措施是成功的，对于刚度较大处的长而不太深的缺陷是有效的。例如球墨铸铁底座1.6 m×1.6 m，重1.3 t，底部长1.5 m表皮下空层，采用上述不预热焊工艺成功，将不预热焊长度提高到了1.5 m。请注意，此例中皮下空层深度只有10 mm，锤击效果比较明显。如果缺陷较深，在20 mm以上，锤击塑性变形仅在表面，对减小应力防止裂纹效果变差。见图4.2-34。

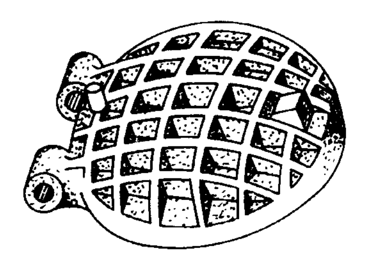


图4.2-33 大型门盖筋板上多处冷隔不预热焊，焊后锤击焊缝

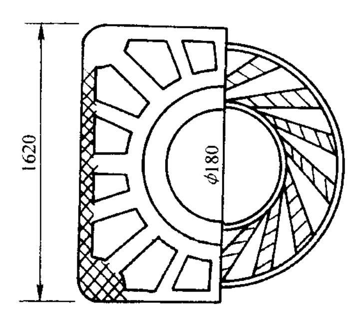


图4.2-34 大型底座表皮下大面积空层不预热焊，焊后锤击焊缝

例3 刚度不大但缺陷面积大而不深缺陷不预热焊补工艺。图4.2-35所示为齿轮壳球墨铸铁毛坯，阴影部为大面积夹砂，尺寸为500 mm×100 mm×25 mm，既长又宽，一次运条难以达到缺陷宽度。可以预先分块，由一端顺序向另一端，逐块多层连续堆焊，逐块焊满的不预热焊工艺，焊后用稻草灰或保温硅酸铝棉覆盖。由于焊补处刚度不大，缺陷深度不大，不会形成过大的应力，因此不会开裂。

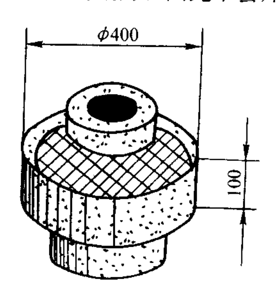


图4.2-35 齿轮壳大面积夹砂500 mm×100 mm×25 mm 不预热逐块多层连续焊

例4 钢厂焦化厂烧结用的焦化车，装载物料进入烧结炉长时间经受高温，烧结工艺完成后再出炉。因此常采用中硅耐热球墨铸铁制造，由于长时间经受高温承重及冷热循环，一般使用20次即在球铁车侧壁上部产生几条裂纹而报废，裂纹长500～1 000 mm，报废量极大。车长约3 m，宽近



2 m，壁厚 20 mm。曾试用镍铁合金焊条电弧冷焊，焊接周期长，成本高，且因长期高温烧结球墨铸铁材质变化不易熔合未能成功；又试用铸铁芯灰铸铁焊条铸 248，虽然焊接起来但一经高温使用就开裂，也不成功。后改用通用铸铁焊条铸 268 焊接，与已变质的球墨铸铁熔合性很好，是出乎意料的。焦化车工作条件是载重、承受高温及冷热循环，这也就是对焊接的要求。用电弧或气割坡口，留 2~3 mm 钝边，清除坡口内的熔渣，用 $\phi5$ mm 铸 268 焊条中等电流施焊，不预热，从裂纹端部开始分段进行，每段摆动，多层连续焊，层间温度 600℃，焊满一段坡口即焊下一段，一次焊完。均未产生裂纹，最长焊缝 1 m 多。焊接修复后使用寿命与新车相当。上述层间温度要求并不严格，只要环境温度达到室温（20℃），处于避风处，连续进行、逐段焊满即可，与钢的焊接除要求逐段焊满外差别并不大，分段长度比异质焊条电弧冷焊大得多，约 80~150 mm。

（2）预热焊

球墨铸铁件大刚度部位的大而深缺陷的焊补，由于热应力很大易产生裂纹，采用不预热焊对工艺要求非常严格，焊接过程不能停顿并按顺序施焊，否则就会产生裂纹。为了提高焊补成功率，在这种情况下可采用局部预热及焊后补充加热的焊补工艺。图 4.2-36 所示弯管模重 450 kg，中部冒口产生大而深的缩松 $\phi200\times60$ mm。图 4.2-37 所示的球墨铸铁机械底座重1 320 kg，冒口位于中部，壁厚 100 mm，冒口缩松尺寸为 220 mm × 80 mm × 50 mm。采用下述工艺可保证焊补成功：先用气割清除缩松，随后加热到 600℃左右，用 $\phi5$ mm 钢芯石墨球化通用铸铁焊条（铸 268）200~250 A 电流分块逐段连续施焊，每块面积 50 mm × 40 mm 以内，第一层注意将残存的轻度缩孔全部封焊住，运条慢一些，在边角处稍作停留，以便保证焊透；遇到夹渣时要使之浮出。第一层没有气孔、夹渣、未熔合，即为保证上层焊缝质量打下了良好的基础。每层连续往返堆焊四五个来回，迅速清渣后再堆焊上面一层，从底堆到距表面 15 mm 左右，用基尔试棒气焊到表面以上并注意与表面形状一致；然后用与第一块完全相同的方法按图 4.2-29 所示顺序在第一块一侧分别堆焊第 2、3、4 块……。这种分块堆焊方法，先焊的块冷却过程中有一定程度的自由收缩，加之焊缝金属及母材都有较好的塑性，能

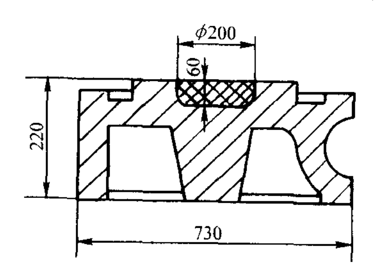


图 4.2-36 弯管模中部大而深的缩松预热 600℃分块逐段连续焊

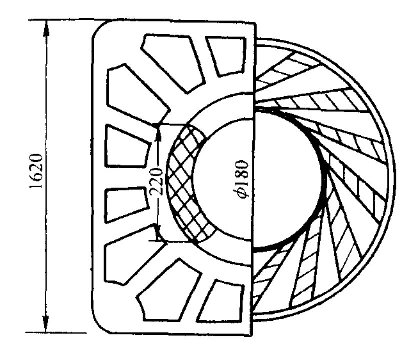


图 4.2-37 大型机械底座中部严重缩松预热 600℃分块逐段连续焊

有效地防止热应力裂纹。这样分块堆焊直至全部焊完。最上层气焊是为了保持焊补区温度，减慢冷却速度。一般情况下焊后用稻草灰覆盖或用硅酸铝保温棉覆盖即可，刚性特大、缺陷特大特深的铸件焊补后 20 min 内入 700℃炉内保温并消除应力，或立即按球墨铸铁牌号进行相应的热处理。

上述刚度和缺陷体积及深度都特大的铸件还是较少的，大部分刚性较大、缺陷较大较深的球墨铸铁件预热焊时只须在用气割割去缺陷后预热至 300~350℃就可确保不裂，如图 4.2-38 所示轴套类铸件，壁厚从 80 mm~150 mm 以上，缺陷尺寸也达到 120 mm × 130 mm × 60 mm 或更大，300℃预热即可。大型曲轴上的缺陷也可采用此法焊补，使用效果也很好。曲轴大部分都是 QT600-3，采用钢芯石墨球化通用铸铁焊条铸 268 焊补，接头力学性能有较大余量，σ_b647~690 MPa、δ5%~6%，因此是安全的。图 4.2-32 所示的小接座筋板上的缺陷是落砂，尺寸虽然不大（100 mm × 55 mm × 20 mm），但在筋板上，且筋板形状向内凹，不预热焊易裂。加热有缺陷筋板相交的中间圆柱面及下部圆盘，均为该筋板两侧，300℃即可。

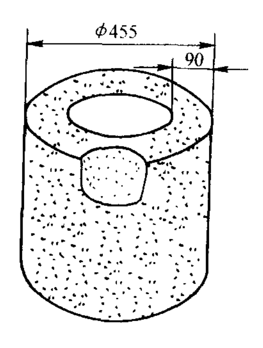


图 4.2-38 大型厚壁轴套铸件的缺陷

6 蠕墨铸铁的焊接

蠕墨铸铁兼有球墨铸铁与灰铸铁的优点，石墨呈蠕虫状，强度较高并有一定的塑性，但较球墨铸铁为低，介于球墨铸铁与灰铸铁之间。因此蠕墨铸铁抗热应力裂纹能力优于灰铸铁而劣于球墨铸铁；蠕墨铸铁稀土及镁的残留含量低于球墨铸铁，故熔合区白口倾向较小。蠕墨铸铁力学性能远不及球墨铸铁，要求较高的重要铸件还是采用球墨铸铁，因此其产量较小。

蠕墨铸铁的焊接除防止裂纹、白口、淬硬之外，焊接接头力学性能亦应达到母材性能。蠕墨铸铁因石墨形状及分布的原因，其导热性次于灰铸铁而优于球墨铸铁，耐热疲劳性能优于灰铸铁而劣于球墨铸铁，耐高温、腐蚀的性能优于灰铸铁而劣于球墨铸铁。灰铸铁因石墨片相互交错甚至相连，长期在高温介质中工作，易形成腐蚀通道并发生氧化变质；球墨铸铁中球状石墨弧立分散而不易发生变质，蠕墨铸铁介于二者之间。因此，除导热性要求高的情况之外，许多场合选择高球化稳定性、低白口倾向的通用铸铁焊条是恰当的，在不预热条件下采用多层连续焊、焊后保温的焊接工艺可以满足上述要求。如果需要焊缝石墨蠕化，可以将通用铸铁焊条铸 268 药皮中不加入球化剂，焊缝成分（质量分数,%）为：C3.1~3.6、Si3.8~4.0、Mn < 0.5、Al0.4~0.7、P < 0.03、S0.001~0.009，Ba、Ca 适量。焊缝石墨为短粗蠕虫状和不圆整球状（少），焊缝力学性能优于蠕墨铸铁，接头力学性能与母材相同，白口倾向小。另一钢芯蠕墨铸铁焊条焊缝成分（质量分数,%）：C3.9、Si3.0、Mn0.4、Al0.3、Ti0.22，Ca、Ba、Re、Mg 适量，S0.015、P < 0.015。焊缝金属 σ_b382 MPa、δ2.5%，焊接接头 σ_b315 MPa、δ1.5%。蠕墨铸铁气焊丝化学成分（质量分数,%）：C3.5~3.7、Si2.7~



3.0、Mn0.4～0.8、Ti0.062、Re0.04～0.059、S＜0.01、P＜0.043，需要焊缝在1 050～1 150℃的冷却速度≤8.33℃/s，或650℃预热焊接，焊缝金属蠕化率＞60%，σ_b385 MPa、δ2%。

异质焊条焊接蠕墨铸铁，采用镍铁合金焊条效果很好，焊接接头力学性能均能达到母材性能，收缩率小，抗裂性好，熔合区白口并不厚。纯镍焊条不仅价格贵，抗裂性也不如镍铁合金焊条。高钒焊条、铁粉稀释型钢焊条 EZFe－2 也可焊接非加工面，H08Mh2Si 细丝 CO_2 气体保护焊是很好的焊接方法，采用小电流低电压短路过渡焊接时熔合区白口窄。

7 可锻铸铁的焊接

可锻铸铁含硅量仅为灰铸铁的50%，铸态为白口，高温长时间退火析出团絮状石墨，因此熔合区难免白口，热焊也难以避免。焊接时切忌过多地使可锻铸铁母材熔化。可锻铸铁力学性能很高，接近球墨铸铁，因此其热应力裂纹敏感性较低，与球墨铸铁相似。

采用异质焊条电弧冷焊时可采用镍铁合金焊条、高钒焊条、稀释性铁粉焊条 EZFe－2，强度要求不高时可用结506。应采用尽可能小的焊接电流、多层焊。如果焊补区需要精加工或钻孔，应先采用细直径（φ2 mm）镍铁合金焊条或纯镍焊条瞬间（1 s）点焊（不移动电弧），为熔合好可采用中等电流，瞬间点焊打底后再用电弧冷焊。采用此种焊接工艺熔合区的石墨尚来不及充分溶解，熔合区就又凝固了，熔合区成分不是铸铁而是高碳钢，上层焊接时熔合区的马氏体回火软化。因此熔合区不存在白口。见图4.2-5。H08Mn2Si 细丝 CO_2 保护焊亦为很好的方法。

可锻铸铁为小型薄壁件，用通用铸铁焊条铸268小电流、多层连续焊，焊缝为铁素体-珠光体上分布球状、团状石墨，熔合区石墨呈蠕虫状、枝晶状。可焊补铸造缺陷、使用中的断裂。螺丝孔损坏后可以先扩大成锥度孔，焊补后重新钻孔、攻丝。

钎焊可锻铸铁也是很好的方法，因母材不熔化，可避免白口，钎焊时最重要的是掌握钎焊温度必须低于1 000℃，防止母材熔化。可采用黄铜钎料，见4.3“灰铸铁火焰钎焊”。

8 白口铸铁的焊补

白口铸铁包括普通白口铸铁和合金白口铸铁。普通白口铸铁及低合金白口铸铁中的碳主要是以渗碳体或合金渗碳体的形式存在、高铬合金白口铸铁（简称高铬铸铁）则以六边形柱状晶 $(CrFe)_7C_3$ 形式存在，其性质都是脆、硬，塑性很低。普通白口铸铁因塑性太差而不单独使用，通常是铸造球墨铸铁表面激冷成白口铸铁的轧辊，利用球墨铸铁的高强度高塑性和白口铸铁表层较高硬度及耐磨性，在冶金工业及其他工业中应用；高铬合金白口铸铁因为 $(CrFe)_7C_3$ 有很高的硬度（1 700HV）而用作磨粒磨损耐磨材料，称为第三代耐磨材料。

普通白口铸铁极少单独应用，研究其焊接性的资料也就极少。白口铸铁与铁、镍能形成焊接连接。但白口铸铁的塑性远劣于灰铸铁，已不能用伸长率来比较，但可以用对热应力的承受能力作比较：灰铸铁能承受一定的热应力，熔焊时热影响区能经受热冲击不产生裂纹，白口铸铁经受这种热冲击时就极易开裂。电弧冷焊时短段焊甚至于点状焊，白口铸铁母材加热发生压缩塑性变形的部分冷却时产生拉应力，焊点以外热影响区产生平行于熔合线的弧状裂纹或垂直于熔合线的裂纹。这种裂纹发生率很高，很难得到没有裂纹的焊接接头。其他各种铸铁都可以选择合适的焊接材料，运用正确的焊接工艺方法，容易焊接并获得符合使用条件的优质焊接接头，唯有白口铸铁因焊接性太差而没有作到。下面还要举冷硬铸铁、高铬合金白口铸铁小面积焊补和大面积堆焊的例子，但焊接并不容易，也得不到优质焊接接头。由于普通白口铸铁几乎没有应用，不作介绍。

冷硬铸铁内部为球墨铸铁或灰铸铁，表面为白口铸铁，其焊补为缺陷渗漏或白口层剥落。应先将表面白口层去掉，先焊内部后焊表面，因此分解为球墨铸铁或灰铸铁的焊接及白口铸铁的焊接两部分。前一部分容易获得高质量焊接接头，后一部分则很难焊接。因此焊补时应充分利用前一部分获得高质量高强度焊接接头、其高度应略出表面，与白口铸铁之间只留出窄的坡口，待中部完全冷却后再焊，以减小应力。冷硬铸铁的焊补主要是轧辊掉皮焊补，它有白口铸铁的焊接问题，而且是难点和关键，但绝不等同于白口铸铁焊接。冷硬铸铁轧辊表层白口掉块的焊补并不多见，不像钢轧辊那样经常进行堆焊且各钢厂都列为正常维修焊接工序。《铸铁电弧冷焊实践》实例：1985年某钢厂轧钢机冷硬铸铁型辊的型槽掉了一块白口铸铁，在缺乏型辊备件的情况下如不及时焊补将影响轧钢生产。焊补工艺：用手砂轮打磨缺陷，将白口铸铁全部清除，用φ3.2 mm镍铁合金焊条、直流正接、90 A电流，先在球墨铸铁上施焊，由于球墨铸铁强度高，要用力锤击，完全按电弧冷焊工艺，底层栽丝。焊缝与白口铁之间留出窄的坡口，待焊缝高于母材之后再焊接堆高焊缝与白口之间的坡口。基本上是间歇点焊法，焊段仅10～15 mm长，冷却后再焊下一段。焊接白口铸铁上常产生裂纹，裂了再焊，直至焊好。然后修磨出槽形。使用效果厂方满意，但寿命达到新辊的80%。

高铬合金铸铁的焊接及堆焊。高铬铸铁制造破碎机锤头常发生断锤，引发重大事故，故现在主要用来制造受冲击较小的耐磨设备，例如辊式破碎机磨辊。如日本产 RP－783 碗式磨煤机磨辊为铸铁与铬15钼3复合铸造，发生不均匀磨损，磨损严重的部位灰铸铁已暴露。因此其焊接既有灰铸铁又有高铬合金白口铸铁母材。焊前先清理并对局部剥落的高铬铸铁补焊，采用结507及奥102。然后埋弧自动焊或手工焊打底。手工焊用结507打底，φ4 mm200～220 A电流熔合较好，横向摆动焊缝宽20 mm、分散焊防止局部过热，堆焊方向为圆周方向，每次焊完一周。这样焊接后收缩应力使焊缝紧紧包住辊子，即使局部裂纹也不致剥落，制造了一个高强度并有一定塑性的筒状底层。大直径外端磨损轻微不需耐磨，用 H08A＋HJ431 埋弧自动焊或结507焊到尺寸，其余部分进行耐磨堆焊。这种方法焊接后不会发生剥落，使用寿命决定于耐磨堆焊合金耐磨性，寿命可以超过新辊。

编写：杨建华（山东大学）



第 3 章　低合金高强度钢的焊接

1　低合金高强度钢的发展

低合金高强度钢是在碳素钢基础上，加入少量合金元素，提高强度并改善使用性能的工程结构用钢。低合金高强度钢的发展已有 100 多年的历史，按照其性能和应用的演变大体上可分为三个阶段，即 1920 年以前，1920 ~ 1960 年和上世纪 60 年代至今。

1920 年以前，低合金钢的用途非常有限，主要用于桥梁和船舶。20 世纪 20 年代以后，焊接技术越来越多地用于金属结构的制造，给低合金高强度钢的发展带来深远的影响。出于对焊接热影响区的韧性和冷裂纹敏感性的考虑，要求降低钢的碳含量，在合金化方面，也要选择淬硬倾向小的元素，因此，低碳和多元素合金化是这一时期的主要发展方向，典型钢种有欧洲的 St52、美国的 HY80、中国的 16Mn 及美国 ASTM 和日本 JIS 标准中的许多钢种。20 世纪 60 年代至今，低合金高强度钢的发展代表着钢铁材料最主要的发展方向，这 40 年低合金高强度钢的产量不断上升，用途越来越广，品种也不断增加，微合金钢的开发和生产工艺的进步是这一阶段发展的主要特征。

微合金元素 Nb、V、Ti 的合理和经济运用是低合金钢普及之快的根本原因。20 世纪 50 年代，Hall 和 Petch 关于晶粒尺寸与屈服强度及脆性转变温度的关系的发现为微合金钢的发展奠定了理论基础。60 年代以后工艺技术的进步，特别是 TMCP 轧钢工艺的广泛应用，大大地推动了微合金钢的发展。微合金钢典型的应用领域为油气输送管线、桥梁、船舶、汽车、工程机械、高层建筑等，其中管线钢最具有代表性。近年来由于国内能源需求的剧烈增长，以西气东输为代表的石油、天然气管道的建设将如火如荼地展开，因此，本章将专门介绍管线钢的焊接。

20 世纪末，世界钢铁工业迎来了新一代钢铁材料（超级钢）的研究热潮，其重点是研究超细晶粒钢。1997 年日本超级钢项目启动，同年韩国的 21 世纪高性能结构钢项目启动，受日本超级钢项目的启发，我国 1998 年启动了新一代钢铁材料重大基础研究项目（973），其后欧洲、北美也相继启动了类似的项目。表 4.3-1 为“超级钢”项目的汇总。

表 4.3-1　新一代钢铁材料（超级钢）项目汇总

年份	国别	项目名称	备注
1997	日本	“超级钢”基础研究	科技厅，十年项目
1997	日本	“超级金属”计划	通产省，铁钢联盟
1998	世界钢铁协会	“超轻钢车身”	35 家欧美钢厂、汽车厂三家
1998	韩国	“21 世纪高性能结构钢”	十年项目
1998	中国	“新一代钢铁材料重大基础研究”	科技部 “973”
2001	欧盟	“超细晶粒钢”	英、德、意、比等国
2002	日本	“环境友好型超细晶粒钢基础研究”	经济产业省

新一代钢铁材料的特征是高洁净度、高纯度和超细晶粒组织、性能较现有材料大幅度提高，强韧性比常用钢材提高一倍，钢材构件的使用寿命提高一倍。因为所研究的钢材是量大面广的焊接结构钢，焊接接头必须达到与钢材本身性能相当的水平，这无疑对焊接技术和焊接材料提出非常严峻的挑战。在超级钢项目中，焊接技术的研究是项目的主要研究内容之一，本章将针对国内外超级钢焊接的研究工作进行总结，并提出针对性的焊接技术。

2　管线钢的焊接

2.1　管线钢的发展

进入 20 世纪 60 年代，整个世界能源需求增加，促进了石油天然气开发。在输送石油天然气的各种手段中（由产地到使用地），管线以其能实现远距离、廉价、大批量等特点、得到很大发展。管线（L/P）不断向大直径、厚壁、高强度方向发展，若在寒冷地带使用，还要求具有高的韧性。L/P 用钢的规格，一般按 API 5LX 规范 UOE 方式进行，如 Grade X42、X46、X52、X56、X60、X65、X75、X80 等。其中数值按 ksi 单位表示屈服点的下限值。根据该规格可基本确定施工和使用条件，然而设计、施工公司及用户从各自角度提出更为严格的附加要求。

管线用钢的不断高强化是为满足管线设计标准要求所至。在同一负载条件下，钢管的强度级别越高，所需钢管的壁厚越小；同一管径条件下，通过提高使用压力，可提高运送能力，因而高强度级别的钢管应用量不断扩大。钢管壁厚减小，可使钢材使用量减少，轻量化可节约钢管运输费用，降低现场焊接施工成本。

1973 年第一次石油危机爆发，石油价格陡升，世界范围内石油天然气开发项目增多，不断要求铺设输送管线。为大量输送天然气，天然气的输送压力由 6 MPa 到 7.5 MPa 直到 10 MPa，不断提高。与此相应，使用钢管由 X60 钢、X70 钢直到 X80 钢。

1978 年第二次石油危机爆发，石油天然气开发向极寒冷海域扩展，对钢材的韧性和耐酸蚀性能有更加严格的要求。因此相关机构和人员开始进行在 - 20℃ ~ - 60℃仍具有高韧性的管线用钢的开发研究。考虑到石油、天然气中含 H_2S、CO_2 等腐蚀性成分，要求钢管具有抗氢致裂纹（HIC）能力和抗应力腐蚀（SCC）能力。为满足性能要求，从以下几方面进行研究开发：从化学成分角度，如低 C 化，添加 Mo、V 等成分设计；从钢材轧制工艺角度、如在双相区（奥氏体、铁素体）进行控制轧制（CR）等工艺；低 S 化和夹杂物的形态控制等制钢技术；连续铸造工艺（CC）等，同时得出了多种解决连续铸造材料的中心偏析问题的工艺方法。对 X60 钢，发现了添加 Ca 可控制 MnS 夹杂物的形态和防止中心偏析，并具有良好的抗氢致裂纹（HIC）能力和抗应力腐蚀（SCC）能力。80 年代中期，TMCP 技术成功应用于管线用钢制作，X65 钢和 X70 钢的耐硫化物应力腐蚀性能也得到充分保证。

20 世纪 80 年代后期到 90 年代，能源需求增多，要求高效输送石油天然气，导致管径和壁厚增加，并要求进一步提高钢材的强度。与此同时石油开发条件的更趋严酷化，要求钢材具有更高的韧性。酸性天然气的开发和输送压力的提高，对钢材的韧性和热影响区的硬度有更高的要求，因此更加严格地规范了现场焊接施工工艺。在此时期，减少杂质含量技术和化学成分控制技术取得显著进步，另一方面 TMCP



技术成功应用，使得管线用钢的性能得到很大程度提高。

1990年左右，虽然在加拿大、阿拉斯加等油田主要使用外径为42~56 in（1 in = 0.025 4 m）的X70钢管，前苏联主要使用抗拉强度590 MPa的管材；但是X80级高强钢已开始着手应用，如在加拿大实际已开始铺设X80钢管线。

1992年以后，屈服强度为689.48 MPa（100 ksi）级的X100钢管的开发取得进展，最近又开始研制屈服强度为827.37 MPa（120 ksi）级的X120钢管。然而，目前为止管线钢主要为强度级别为X70及X70以下的管线钢，X80的实际应用还有限（加拿大、捷克、德国、英国），X100和X120钢管尚没有实际应用。

管线用钢兼有高韧性、良好的焊接性、抗氢致裂纹能力、抗应力腐蚀等特点，并不断向高强化、超厚化发展。CR（非水冷型TMCP）、水冷型TMCP技术使得制作满足高性能要求的钢材成为可能。

2.2　管线钢的焊接性

钢材的焊接性主要体现在两个方面：首先是否易于焊接，在焊接过程中是否产生焊接缺陷；其次是焊接接头的服役性能。对于管线钢的焊接性，主要关注两个方面：其一是冷裂纹敏感性；其二是焊接热影响区和焊缝的力学性能，这两个方面都与热影响区的组织有直接关系。

2.2.1　冷裂纹问题

众所周知，扩散氢、脆性组织和残余应力是冷裂纹产生的三要素，碳当量公式（如IIW的CEN公式）、HAZ最大硬度等都被用来评价钢材的冷裂敏感性。Pcm是应用最多、影响最广的经验公式。

对于管线钢，由于TMCP技术和微合金化技术的广泛应用，碳含量和碳当量都大幅度降低，因此，其冷裂敏感性不明显，除非在极端情况下（很大的拘束度或扩散氢含量很高），一般不会遭遇冷裂纹。

值得注意的是焊缝金属冷裂纹问题。母材强度的提高和焊接性的改善，促使冷裂纹发生的位置从HAZ转移到焊缝（WM）。基于焊后随时间变化氢对局部临界开裂应力的影响，Matsuda等提出了判别高强钢冷裂纹位置的基本方法，焊后焊缝中的氢含量随时间单调减少，而HAZ的氢含量先从母材基础值升高到峰值然后下降，整个过程只有几分钟，恰好与残余应力发生的过程同步，通过计算残余应力值随时间的变化，以及HAZ和WM受实时扩散氢含量影响的临界开裂应力，即可预测冷裂纹发生的位置。高强度焊缝金属对裂纹敏感性大，当然有利于WM冷裂纹。影响WM冷裂纹的还有残余应力值及其产生的时间，如果较早地产生较大的残余应力，则有利于WM冷裂纹值。相反，低强度焊缝金属、低残余应力或较晚产生残余应力有利于HAZ冷裂纹的产生。

WM冷裂纹的控制因素也和HAZ冷裂纹一样，既应力、组织和氢三要素，某文献通过残余应力、扩散氢的累积表明多层焊对WM冷裂纹更敏感，并给出多层焊防止WM冷裂纹的预热温度为：

$$T\ (℃) = AR_m + B\log\ [H] + C$$

式中，R_m为焊缝金属的抗拉强度，它代表了焊缝金属的组织特性。

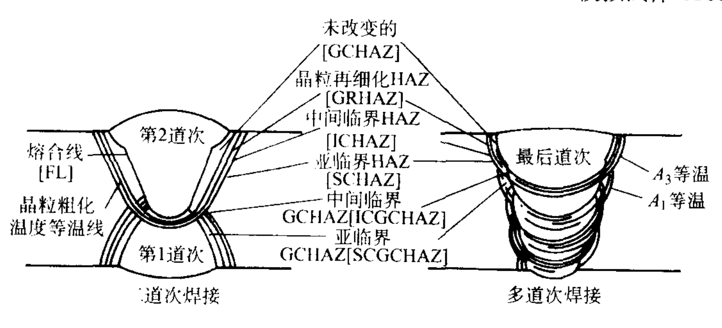
2.2.2　热影响区的组织和韧性

HAZ由不同区域的组织构成，每一区域的组织都受加热速度、峰值温度和冷却速度的影响。如图4.3-1所示，对于单道焊，根据峰值温度，HAZ可划分为粗晶区（GCHAZ）、细晶区（GRHAZ）、中间临界区（ICHAZ）和亚临界区（SCHAZ）；对于双道焊或多层焊，第二道焊道的HAZ与第一道重叠，在第一道的HAZ中形成部分或完全再热区，其中最引人注目的是亚临界再热粗晶区（SCGCHAZ）和中间临界再热粗晶区（ICGCHAZ）。

1）粗晶区（GCHAZ）的组织与韧性　粗晶区（GCHAZ）因为奥氏体长大和易形成脆性组织而倍受关注，在1 000℃以上，奥氏体长大迅速，利用微合金元素形成微小的碳化物或氮化物粒子是限制奥氏体晶粒长大的有效途径，Nb和Ti是应用最多的微合金元素（见图4.3-2），在管线钢、船板和建筑结构中均广泛使用。然而，必须严格控制其含量，使得碳氮化物粒子既不会太粗，也不会过分地细小。

粗晶区的相变组织是影响其韧性水平的主要因素。GCHAZ奥氏体在冷却过程中发生相变，相变组织主要取决于材料的淬透性和冷却速度，还取决于是否存在抑制晶界铁素体的B，以及晶内是否有促进铁素体形核的细小粒子如TiO_2，而这一切均能够在相变温度范围中体现。图4.3-3为碳含量和相变温度对GCHAZ组织的影响以及对脆性转变温度的影响。从图4.3-3可见，在低碳含量水平（0.07%），高于530℃相变温度下形成的不利组织逐渐被460~400℃相变温度下形成的下贝氏体和自回火马氏体所取代，在较宽的相变温度范围内都能获得韧性良好的组织，这说明较大的热输入范围都适用；在中间碳含量（0.14%），趋势是相同的，但获得良好韧性的相变温度范围要窄一些；在高碳含量水平（0.21%），很难得到高韧性，即使是下贝氏体的韧性都较差，形成的马氏体也为孪晶马氏体，因为马氏体相变点较低，几乎没有多少自回火效应发生。

2）中间临界再热粗晶区（ICGCHAZ）的组织与韧性　中间临界再热粗晶区（ICGCHAZ）往往是可能的低韧性区，尤其是形成M－A组元的情况下。在ICGCHAZ中，后续焊道将前边焊道的粗晶区再热到A_{c_1}~A_{c_3}的温度，使其发生部分奥氏体化转变，部分奥氏体化转变导致局部富碳的奥氏体的形成，并在冷却时转变为高碳孪晶马氏体。这些脆性的“小岛”尺寸可达5 μm，在ICGCHAZ中的相比例可达5%，因此导致ICGCHAZ的韧性大幅度下降。图4.3-4所示焊接热模拟试样CTOD试验的结果显示了这一点。



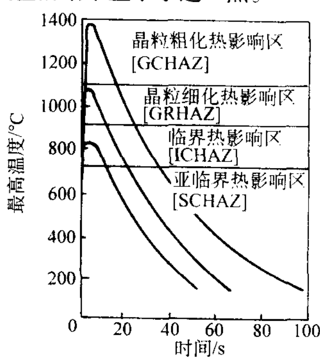


图4.3-1　双道焊和多层焊HAZ组织示意图

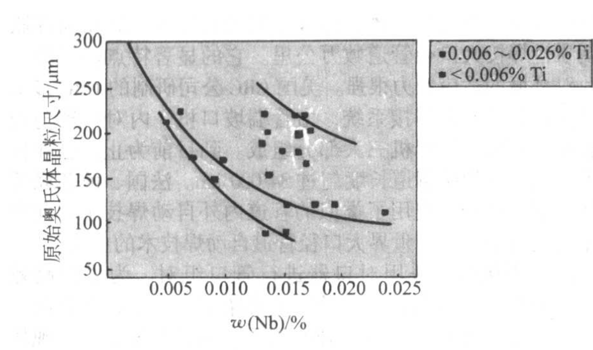


图 4.3-2　Nb、Ti 微合金化对抑制 GCHAZ 奥氏体晶粒长大的作用

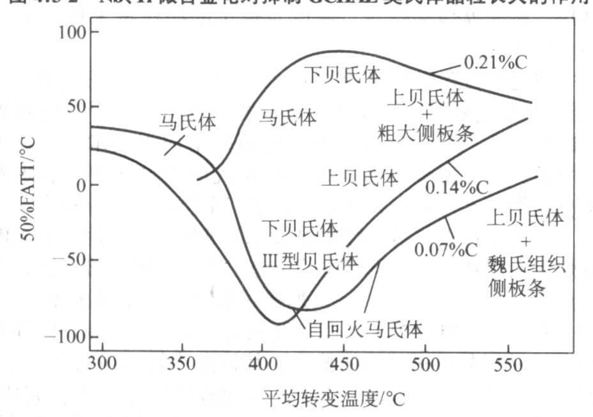


图 4.3-3　碳含量和相变温度对 GCHAZ 组织的影响以及对脆性转变温度的影响

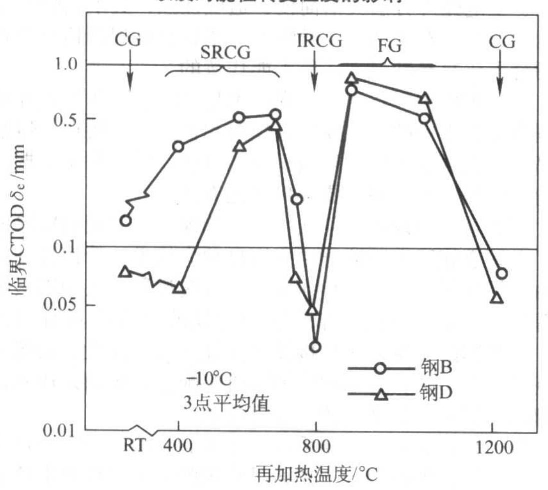


图 4.3-4　模拟多层焊粗晶区再热区的断裂韧性

3）局部脆性区（LBZ）的影响　LBZ 一般发生在 GCHAZ 和 IRGCHAZ，较少地发生在 ICHAZ。上世纪 80 年代以来，LBZ 问题引起了广泛的关注和争议。一方面，CTOD 试验发现 LBZ 的韧性很低，有时 CTOD 值低到 0.05 mm 以下，另一方面，尚没有关于 LBZ 导致焊接结构提早失效的案例。有关 LBZ 的研究很多，总的说来 LBZ 的韧性取决于 LBZ 的宽度，如图 4.3-5 所示。LBZ 越宽，CTOD 值就越低，而 IRCGHAZD 的韧性又是最低的，所以，在多层焊时焊道的布置和焊接工艺的控制十分重要。

2.2.3　焊缝金属的组织与韧性

受化学成分和冷却速度的影响，焊缝金属在从奥氏体到铁素体的相变过程中能产生很多种组织。对于低碳钢和低合金钢，每一个奥氏体晶粒相变后的组织一般由以下组分中（按相变温度递减的顺序排列）的两种或两种以上组成：晶界铁素体（GF），多边铁素体（PF），魏氏体（WF），针状铁素体（AF），上贝氏体（UB），下贝氏体（LB），马氏体（M）。

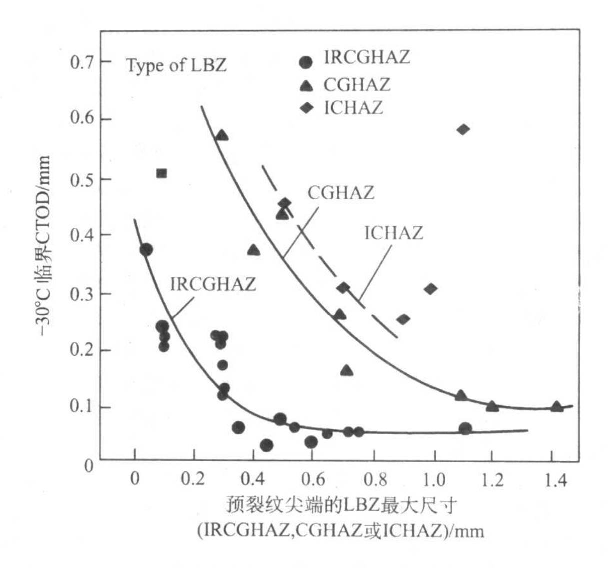


图 4.3-5　LBZ 宽度对其临界 CTOD 值的影响

最理想的组织是针状铁素体，它能使韧性和强度同时提高。针状铁素体的转变温度在魏氏体和下贝氏体之间，图 4.3-6 示意出焊缝金属在连续冷却过程中的组织转变过程：

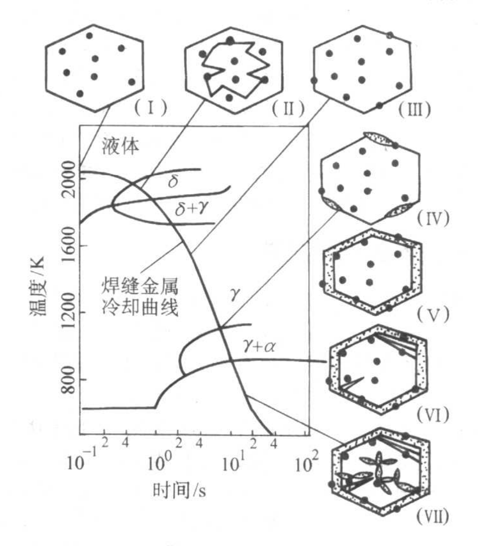


图 4.3-6　焊缝金属连续冷却相变过程示意

（Ⅰ）夹杂物形成；（Ⅱ）焊缝金属凝固成 δ 铁素体；（Ⅲ）全奥氏体组织；（Ⅳ）晶界铁素体形核；（Ⅴ）晶界铁素体沿奥氏体晶界长大；（Ⅵ）形成魏氏体；（Ⅶ）形成针状铁素体。从图中（Ⅳ）可见焊缝金属的转变是从形成非金属夹杂物开始的，夹杂物是液态焊缝金属与气体、脱氧剂和熔渣反应的产物，它一方面能作为针状铁素体的形核核心，形成高强高韧的针状铁素体组织，另一方面，又会成为塑性断裂的韧窝或脆性断裂的解理核心。典型的弧焊焊缝每 1 m^3 约含有 10^{18} 个大于 0.05 μm 的夹杂物，但只有较大的夹杂物才能成为针状铁素体的形核核心，因为形核自由能随夹杂物尺寸的增加而减少。有研究表明焊缝金属中有许多大于齐纳（Zener）粒子直径的夹杂物对形成针状铁素体组织是最理想的，也有研究表明能作为针状铁素体的形核中心的夹杂物的尺寸平均为 0.4 μm。控制夹杂物的主要因素是溶解气体（如氧、氮）和脱氧剂（如铝、钛、硅、锰），夹杂物的特征因素有成分、尺寸和数量密度，以及其氧化顺序和残留脱氧剂含量，固溶体中的残留脱氧剂控制奥氏体的低温相变，而夹

杂物的成分、尺寸、密度和氧化顺序则影响焊缝的组织结构，从标准自由能计算，氧化顺序依次为 Al_2O_3，Ti_2O_3（或其他形式的钛氧化物 Ti_xO_y），SiO_2，MnO，但实际情况要复杂得多。首先，焊缝的奥氏体相变是个动态过程，必须考虑动力学因素；其次，不仅会形成简单氧化物，还会形成复杂氧化物（如 $MnOAl_2O_3$，$FeOAl_2O_3$）；此外，脱氧剂的含量对氧化顺序也有影响。综合考虑这些因素，才能得出正确的结论。以 Fe-0.07C-0.8Si-1.7Mn-0.025Ti-0.026Al-0.084O（质量分数,%）焊缝金属为例，其氧化顺序依次为 Al_2O_3、$MnOAl_2O_3$、Ti_3O_5，$FeOAl_2O_3$，TiO_2、SiO_2 和 MnO。焊接材料制造者都通过调整焊缝金属的成分，尽量在全焊缝试验时获取更多的针状铁素体。其中最有效的途径是加入 Ti、B、N 等微量合金元素。氧化钛（TiO、Ti_2O_3，TiO_2）非常容易成为针状铁素体的形核核心，氮化钛 TiN 虽然也有一定的效用，但在高温下不如氧化钛稳定，问题是填充材料中一般都含有铝，氧化铝不能作为针状铁素体的形核核心，因为铝与氧的结合力比钛强，最先形成的是氧化铝，然后在其表面形成薄薄的一层氧化钛，所以，必须有足够的氧含量，而最低氧含量又取决于铝的含量，过量的铝会消耗太多的氧，致使 Ti 不能形成氧化钛，从而限制针状铁素体的产生。Harrison 对管线钢埋弧焊焊缝的研究结果表明最佳 Al:O 比为 0.84，即与Al_2O_3·MnO 的化学配比相符，最佳 Ti:O 比为 0.1。N 一般不作为合金元素加入，其主要来源是电弧气氛、焊接材料中的杂质及母材，N 含量偏高能引起应变时效脆化；在不加入 B 的情况下 N 对焊缝组织的影响不大，而加入 B 就不一样，它改善奥氏体的淬透性，从而提高奥氏体转变为针状铁素体的机会，减少晶界铁素体的形成机率。在加入 B 时，必须要同时加入 Ti。一方面 Ti 保护 B 不在电弧中氧化，同时也防止 B 形成氮化物，因为 B 只有固溶在奥氏体中才能提高奥氏体的淬透性，过多的 B 致使碳化硼的形成，对韧性不利。

2.3 管线钢的焊接工艺

管线钢的焊接，包括工厂制管焊接和现场焊接。对大直径管道，通常采用 UOE 方法或螺旋焊管方式制造。现场铺设时，进行环焊缝焊接。建造钢管时的纵缝采用埋弧焊工艺（SAW）。为提高焊接效率，从焊接材料和焊接工艺条件两方面一直在进行研究。UOE 钢管是从内侧和外侧分别进行焊接。从串联式双丝 SAW 开始，发展到 3 丝 SAW、4 丝 SAW，日本 1995 年开发成功 6 丝 SAW 工艺。对外径 762 mm、壁厚 23.8 mm 的管道，4 丝 SAW 比 3 丝 SAW 提高焊接速度 1.3 倍，6 丝比 4 丝 SAW 提高速度 1.7 倍，焊缝成型良好并且使用烧结型中性焊剂可保证焊缝金属的韧性。

2.3.1 现场焊接的特点

由于发现和开采的油气田地处边远地区，地理、气候、地质条件恶劣，社会依托条件较差，给施工带来很多困难，尤其低温带来的麻烦最大。此外，管线的结构形式也给焊接带来困难，主要有以下几个方面：

① 要求全位置焊接；

② 多数情况下，要求单面全焊透；

③ 对接焊缝分布在整条管线的不同地点，导致焊接环境不断变化，包括温度、湿度、风速等；

④ 尽管施焊环境恶劣，但对焊接质量的要求却很高。

当今管道工业要求管道有较高的输送压力和较大的管线直径，并保证其安全运行。为适应管线钢的高强化、高韧化、管径的大型化和管壁的厚壁化，出现了多种焊接方法、焊接材料和焊接工艺。

国外管道焊接施工经历了手工焊和自动焊的发展历程。手工焊主要为纤维素焊条下向焊和低氢焊条下向焊。在管道自动焊方面，有前苏联研制的管道闪光对焊机，其在前苏联时期累计焊接大口径管道数万公里。它的显著特点就是效率高、对环境的适应能力很强。美国 CRC 公司研制的 CRC 多头气体保护管道自动焊接系统，由管端坡口机、内对口器与内焊机组合系统、外焊机三大部分组成。到目前为止，已在世界范围内累计焊接管道长度超过 34 000 km。法国、前苏联等其他国家也都研究应用了类似的管道内外自动焊技术，此种技术方向已成为当今世界大口径管道自动焊技术的主流。

现场焊接时，采用对口器进行管口组对。为了提高效率，一般是在对好的管口下放置基础梁木或土堆，在对前一个对接口进行焊接的同时，开始下一个对接准备工作。现场焊接位置为管水平固定或倾斜固定对接，包括平焊、立焊、仰焊、横焊等焊接位置。所以对焊工的操作技术提出了更高、更严的要求。

我国钢质管道环缝焊接技术经历了几次大的变革。20 世纪 70 年代采用传统焊接方法，即低氢型焊条手工电弧焊上向焊技术，80 年代推广手工电弧焊下向焊技术，为纤维素焊条和低氢型焊条下向焊，90 年代应用自保护药芯焊丝半自动焊技术，到今天开始全面推广全位置自动焊技术。

手工电弧焊包括纤维素焊条和低氢焊条的应用。手工电弧焊上向焊技术是我国以往管道施工中的主要焊接方法，其特点为管口组对间隙较大，焊接过程中采用息弧操作法完成，每层焊层厚度较大，焊接效率低。手工电弧焊下向焊是 80 年代从国外引进的焊接技术，其特点为管口组对间隙小，焊接过程中采用大电流、多层、快速焊的操作方法来完成，适合于流水作业，焊接效率较高。由于每层焊层厚度较薄，通过后面焊层对前面焊层的热处理作用可提高环焊接头的韧性。手工电弧焊方法灵活简便，适应性强，其下向焊和上向焊两种方法的有机结合及纤维素焊条良好的根焊适应性在很多场合下仍是自动焊方法所不能代替的。

自保护药芯焊丝半自动焊技术是 20 世纪 90 年代开始应用到管道施工中的，主要用来填充和盖面。其特点为熔敷效率高，全位置成型好，环境适应能力强，焊工易于掌握，是目前管道施工的一种重要焊接工艺方法。

随着管道建设用钢管强度等级的提高，管径和壁厚的增大，在管道施工中逐渐开始应用自动焊技术。管道自动焊技术由于焊接效率高、劳动强度小，焊接过程受人为因素影响小等优势，在大口径、厚壁管道建设的应用中具有很大潜力。但我国的管道自动焊接技术正处于起步阶段，根部自动焊问题尚未解决，管端坡口整形机等配套设施尚未成熟，这些都限制了自动焊技术的大规模应用。

目前自动焊根焊主要采用 STT 半自动焊。STT 半自动焊属于 CO_2 气体保护焊，它是通过精确的基值和峰值电流和电压控制，使熔滴过渡更利于成形，焊接过程稳定，解决了飞溅问题和大口径管道根部焊环节单面焊双面成型的难题。

2.3.2 西气东输管道工程中应用的焊接方法

由于西气东输线路工程用钢管的强度等级较高，管径和壁厚较大，所以线路施工以自动焊和半自动焊为主，手工焊为辅。所涉及的主要焊接方法有熔化极气体保护电弧焊（GTAW）、自保护药芯焊丝电弧焊（FCAW）和手工电弧焊（SMAW）。

自动焊方法包括：①内焊机根部焊 + 自动外焊机填充、盖面；②STT 气体保护半自动焊根部焊 + 自动外焊机填充、盖面；③纤维素焊条手工电弧焊根部焊 + 外焊机自动焊填充、盖面。这几种焊接方法的区别在于根部焊方法的不同。

针对管道局自动外焊机 PAW-2000、英国自动外焊机 NOREAST，西气东输管道工程技术小组分别进行了焊接工艺性能试验。试验结果表明，对于大口径、厚壁钢管，采用自动焊的方法焊接具有十分明显的优势，劳动强度大大降低，



焊接效率显著提高。试验还表明，自动外焊技术对坡口形状及管口组对要求严格，现场施工必须具备内对口器、管端坡口整形机等配套机具。另外，采用手工焊或半自动焊方法进行根部焊时，由于管口组对间隙不同造成坡口形状、尺寸不一致，自动外焊机填充、盖面时就极易形成坡口边缘未熔合，从而制约了自动外焊机优势的发挥。

半自动焊方法为纤维素型焊条手工下向根部焊，自保护药芯焊丝半自动焊填充、盖面。手工电弧焊方法为纤维素型焊条下向焊根部焊，低氢型焊条下向焊填充、盖面。

管道焊接施工中采用的焊接材料有纤维素型焊条、低氢型焊条、自保护药芯焊丝和 CO_2 气体保护实芯焊丝。纤维素型下向焊条的药皮中含有 30% ~ 50% 的有机物，具有极强的造气功能，在保护电弧和熔池的同时增加了电弧吹力，适合于全位置单面焊双面成型。低氢型下向焊条的药皮中含有铁粉，可增加熔敷效率，提高焊接接头力学性能，适用于山区、水网等地形复杂或焊接自动化程度要求不高的场合。自保护药芯焊丝由药芯高温分解释放出的大量气体对电弧及熔池进行保护，同时通过熔渣对熔池及凝固焊缝金属进行保护，是管道施工的一种重要的焊接材料。CO_2 气体保护实芯焊丝主要用于 STT 半自动焊和全位置自动焊。

为保证西气东输线路工程环焊接头的强韧性，经工艺试验选择使用了表 4.3-2 所示的焊接材料。

表 4.3-2　西气东输线路工程试验段使用焊材情况

焊材类别	焊材标准号	用途
纤维素型焊条	AWS A 5.1 E6010	手工电弧焊根焊
	AWS A 5.5 E8010 - G	手工电弧焊热焊
低氢型焊条	AWS A 5.5 E8018 - G AWS A 5.5 E8018 - P1	手工电弧焊填充焊、盖面焊
自保护药芯焊丝	AWS A 5.29 E71T8 - K6 AWS A 5.29 E71T8 - Ni2	半自动焊填充焊、盖面焊
CO_2 气保护实芯焊丝	AWS A 5.18 ER70S - 6 AWS A 5.18 ER70S - G	STT 半自动根焊或内焊机根焊
	AWS A 5.18 ER70S - G AWS A 5.18 ER80S - G	自动外焊机用填充、盖面

2.3.3　管道焊接施工未来的展望

为了提高经济性，管线的直径和输送压力在不断提高，对于给定强度级别，大直径意味着质量的增加、钢材成本的增加，以及建设周期和建设成本的增加。提高管线钢的强度级别是克服这些缺点的唯一途径。目前 X80 的实际应用还有限（加拿大、捷克、德国、英国），X100 和 X120 钢管上尚没有实际应用。世界对能源的需求到 2020 年将增加 50%，为此需要进一步推广 X80，进一步完善 X100 和 X120 钢，包括铺设技术的开发、自动焊接技术的开发、高强高韧焊接材料的开发、以及质量保证技术的开发。

在新焊接技术方面，法国 SERIMER DASA 公司开发了适合 X80/X100 的双丝窄间隙 GMAW 自动焊，川崎重工正在开发全位置电子束焊接系统，TWI（英国焊接研究所）在激光-MAG 复合焊方面作了开拓性工作。在自动超声波无损探伤技术方面，新的软件技术的开发增强了可靠性和机动性。

3　400 MPa 级超细晶粒钢的焊接

3.1　超细晶粒钢焊接热影响区的晶粒长大

3.1.1　热影响区晶粒长大动力学

新一代钢铁材料的特征是超细晶粒尺寸、高纯度和高均匀性。超细晶钢经焊接热循环作用后，其热影响区（HAZ）有明显的晶粒长大现象。

晶粒长大的过程是系统总的晶界面积减小、总的界面自由能降低的过程。界面自由能的降低为晶粒长大提供了驱动力。假设晶粒边界（gb）的平均曲率半径与晶粒平均直径 d 成比例，则晶粒长大的近似平均驱动力为：

$$\Delta G = \frac{2\gamma_{gb}}{d}\ \left(\frac{1}{\text{单位体积}}\right) \tag{4.3-1}$$

Ashby 和 Easterling 给出的平均晶粒长大速度为：

$$\bar{v} = M\frac{2\gamma_{gb}}{d} \tag{4.3-2}$$

式中，γ_{gb} 为晶界 gb 的表面能；M 为晶界迁移率，是温度的函数。

焊接 HAZ 中的晶粒长大发生在非等温条件下，温度是时间的函数。在非等温条件下的晶粒长大可以表示为：

$$D^{1/n} - D_0^{1/n} = k_0\int_0^{\infty}\exp[-Q/(RT(t))]\mathrm{d}t \tag{4.3-3}$$

式中，D 为晶粒直径；D_0 为初始晶粒大小；k_0 为晶粒长大的动力学常数；Q 为晶粒长大的激活能；$T(t)$ 为温度随时间变化的曲线方程；n、k_0 和 Q 是与材料相关常数，其值可以通过等温实验来确定。

Ashby 和 Easterling 用一个简单的动力学方程来计算奥氏体晶粒的长大：

$$\frac{\mathrm{d}d}{\mathrm{d}t} = Af(d)\ \exp-\left(\frac{Q}{RT(t)}\right) \tag{4.3-4}$$

式中，A 为动力学常数；$f(d)$ 为有关晶粒直径的一个函数；自扩散的激活能 Q 与杂质的拉曳作用有关，需经实验来估测。

对于低碳钢材料，一般认为，在升温阶段，温度高于 A_{c_3} 时奥氏体化过程就已经结束，奥氏体晶粒开始长大，而在降温阶段，温度低于 A_{r_3} 时奥氏体晶粒长大就已经结束。事实上由于焊接过程加热和冷却的速度都非常快，奥氏体晶粒开始长大和结束长大的时间都不易确定。只是奥氏体晶粒的粗化主要发生在高温阶段，奥氏体晶粒长大始末时间的不确定对我们关心的粗晶区奥氏体晶粒的长大影响不大。

把焊接热循环曲线分成两段来处理，即加热阶段和冷却阶段。加热阶段的热循环曲线可假设为直线，其方程为：

$$T_{加}(t) - T_0 = (T_p - T_0)/t_p t \tag{4.3-5}$$

冷却阶段的热循环曲线方程为：

$$\begin{aligned}T_{冷}(t) - T_0 = &\{t_{8/5}(500-T_0)^2(800-T_0)^2/\\&[300(1\,300-2T_0)(t+t_p-t_i)]\}^{1/2}\times\\&\exp\{t_{8/5}(500-T_0)^2/[2e(1\,300-2T_0)(t+t_p-t_i)]\}\end{aligned} \tag{4.3-6}$$

本研究将奥氏体晶粒存在的时间区间定为 $(A_{c_3},\ A_{r_3})$，则 HAZ 奥氏体的晶粒长大方程可粗略表示为：

$$\begin{aligned}D^{1/n'} - D_0^{1/n'} = &K\int_{t_{ac3}}^{t_p}\exp(-Q'/(RT_{加}))\mathrm{d}t + \\&K\int_{t_p}^{t_{ar3}}\exp[-Q'/(RT_{冷})]\mathrm{d}t\end{aligned} \tag{4.3-7}$$

利用该模型分别计算出 400 MPa 和 800 MPa 超细晶粒钢的焊接热影响区晶粒长大图，计算结果与实测值相吻合。

在大多数钢中，碳化物及氮化物质点会阻止晶粒长大，被称为析出相质点钉扎。假定半径为 r 的质点的体积百分比为 V_f，与晶界相互作用的质点的平均数为 $3V_f/2\pi r^2$，则单位面积的拘束力由下式给出：

$$P = \frac{3V_f}{2\pi r^2}\pi r\gamma_{gb} = \frac{3V_f\gamma_{gb}}{2r} \tag{4.3-8}$$

令拘束力 P 与晶粒边界驱动力 $2\gamma_{gb}/d$ 相等可求解出质点弥



散条件下晶粒长大的最大尺寸：

$$d_{max} = K_z r / V_f \quad (4.3\text{-}9)$$

K_z 通称为 Zener 系数，对于实际的低合金钢焊缝，K_z 在 0.32～0.93 之间。

钢铁材料经过焊接后，原先材料中的析出相质点会发生两个重要的变化：①析出相质点的粗化；②析出相质点的溶解。当温度低于析出相的平衡溶解温度 T_{eq} 时，析出相质点可能发生粗化；在稍高于平衡溶解时，析出相溶解便是一个主要过程。但二者之间没有明显的界线，在析出相粒子溶解和析出相粒子粗化之间存在一个过渡性的"模糊区"。

在焊接过程中，析出相粒子是在过热条件下溶解的。由于高温停留时间很短，整个扩散过程时间又有限，溶解的析出相组成元素的原子来不及均匀地扩散到基体中去，扩散范围只局限于溶解域，溶解域内析出相元素的浓度较高，域外的浓度则为零。设溶解域的体积分数用 f 来表示，则溶解域内析出相形成元素 M 的平均浓度为 C_M/f，C 的浓度为 C_C/f，因此焊接过程析出相的溶解温度 T_s 为：

$$T_s = \frac{B}{A - \lg\left(\frac{C_M^a C_C^b}{f^{(a+b)}}\right)} \quad (4.3\text{-}10)$$

在恒定温度 T 时，析出相质点长大的计算公式为：

$$p^3 - p_0^3 = (C_t/T)\exp(-Q_3/RT) \quad (4.3\text{-}11)$$

式中，p_0 为析出相质点原来的平均直径；p 为长大后的平均直径；Q_3 为扩散过程活化能；C 为常数。

3.1.2 原始铁素体晶粒尺寸对热影响区晶粒长大的影响

从新一代钢铁材料的特征来看，它与传统钢铁材料相比，主要是材料中原始铁素体晶粒尺寸大小的差别。而焊接是直接关系到新一代钢铁材料未来应用的关键技术，在焊接热作用下，焊接热影响区 HAZ 会发生粗化，成为整个焊接接头性能的薄弱环节。因此研究母材金属中原始铁素体晶粒尺寸对焊接 HAZ 粗化的影响，具有重要意义。

(1) 试验材料和试验方法

试验材料为 3 mm 厚 SS400 细晶钢，其化学成分和力学性能见表 4.3-3 和表 4.3-4。

表 4.3-3 SS400 细晶钢的化学成分（质量分数）

%

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Cr	Mo	Ni
0.171	0.09	0.36	0.013	0.013	0.025	0.01	0.02	0.01	0.03

表 4.3-4 SS400 细晶钢的力学性能

试验温度/℃	抗拉强度/MPa	σ_S/MPa	断后伸长率 δ_5/%	硬度 $HV_{0.2}$
21	480	365	31	153

利用 KO－11 硅碳棒高温炉（8 kW）和 ZKW－程序控温装置（8 kW）把 SS400 细晶钢进行退火处理，即：分别随炉升温到 930℃＋0 min、930℃＋15 min、930℃＋30 min 后再炉冷，从而得到具有化学成分相同、原始铁素体尺寸不同的试验材料，把这些材料分别记为：1# 材料、2# 材料和 3# 材料。

把 SS400、1# 材料、2# 材料和 3# 材料均制成金相磨片，用 2% 的硝酸酒精腐蚀，在光学显微镜下，可观察到清晰的 $\alpha + P$ 显微组织，采用截线法测定原始铁素体的晶粒尺寸。

把这些不同原始铁素体尺寸的试验材料加工成板状热模拟试件，其横截面尺寸为：3 mm×10.5 mm。在 Gleeble 1500 热模拟试验机上进行不同制度的焊接热模拟后，沿均温区中心截开制成金相磨片，用饱和苦味酸＋表面活性剂腐蚀试样，在光学显微镜下可清晰地观察到奥氏体晶界，用截线法测量并统计奥氏体平均晶粒尺寸。其具体的热模拟制度为：加热峰值温度 T_p = 1 350℃，$t_{8/5}$ 从 3 s 到 20 s 变化；$t_{8/5}$ = 5 s，T_p 为 1 300℃、1 200℃和 1 350℃。

在快速加热条件下，利用 Formaster－Digital 全自动相变仪测定其相变点，此时，快速加热的目的是为了模拟实际焊接情况。其具体的工作条件为：从室温到 1 000℃（需 30 s）；1 000℃保温度 2 s；从 1 000℃到 300℃（需 700 s）；从 300℃到室温（需 50 s）。

把板厚为 3 mm 的 SS400 细晶钢和原始铁素体晶粒尺寸最大的材料即 3# 材料，应用 Transpuls SynergicTPS450 焊机，采用脉冲 MAG 焊的相同规范，制成焊接接头，采用的保护气体为富 Ar 气体即 Ar80%-$CO_2$20%，其流量为 20 L/min，所采用的具体焊接参数见表 4.3-5。

表 4.3-5 焊接接头时所采用的参数

焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/mm·s⁻¹	送丝速度/m·min⁻¹
96	21	6.5	4.8

把 SS400 细晶钢和原始铁素体晶粒尺寸最大的材料，即 3# 材料分别随炉升温到 930℃和 1 000℃后保温 0 min、10 min、20 min 和 30 min 后立即淬火，把这些试样制作成金相磨片，用饱和苦味酸＋表面活性剂腐蚀试样，在光学显微镜下可清晰地观察到奥氏体晶界，用截线法测量并统计这些材料所保存下来的奥氏体晶粒尺寸。

(2) 实验结果

SS400、1# 材料、2# 材料和 3# 材料的原始铁素体晶粒尺寸的测定结果见表 4.3-6。焊接热模拟后，粗晶区中奥氏体晶粒尺寸测定结果见表 4.3-7。其中不同峰温系列的见表 4.3-7 (1)，不同 $t_{8/5}$ 系列的见表 4.3-7 (2)，相变点的测试结果见表 4.3-8。

表 4.3-6 试验材料的原始铁素体尺寸测定结果

μm

试验材料	SS400	1# 材料	2# 材料	3# 材料
原始铁素体尺寸	7	18	23	30

表 4.3-7 热模拟试件奥氏体晶粒尺寸测定结果

μm

(1) $t_{8/5}$ = 5 s，不同 T_p 时奥氏体粒径的测定结果

试样号	SS400	1# 材料	2# 材料	3# 材料
T_p = 1 200℃	73	69	60	69
T_p = 1 300℃	111	125	96	97
T_p = 1 350℃	115	128	117	106

(2) T_p = 1 350℃，$t_{8/5}$ 不同时奥氏体粒径的测定结果

试样号	$T_{8/5}$ = 3 s	$T_{8/5}$ = 5 s	$t_{8/5}$ = 8 s	$t_{8/5}$ = 12 s	$t_{8/5}$ = 20 s
SS400	102	115	118	133	170
1# 材料	108	128	136	140	200
2# 材料	110	115	117	131	278
3# 材料	93	106	—	146	160

表 4.3-8 不平衡加热冷却条件下试验材料相变点的测定结果

℃

试验材料	A_{c_1}	A_{c_3}	A_{r_1}	A_{r_3}
SS400	725	840	645	745
1# 材料	725	865	655	775
2# 材料	730	865	635	770
3# 材料	725	870	645	800

SS400和3#材料分别随炉升温到930℃和1 000℃，保温0 min、10 min、20 min和30 min后立即淬火所得的这些试样，其保存下来的奥氏体粒径测定结果见表4.3-9和表4.3-10。

表4.3-9　930℃不同保温时间所得奥氏体的粒径测定结果　μm

材料	0 min	10 min	20 min	30 min
SS400	6	19	90	160
3#材料	20	21	28	28

表4.3-10　1 000℃不同保温时间所得奥氏体的粒径测定结果　μm

材料	0 min	10 min	20 min	30 min
SS400	144	148	152	157
3#材料	30	36	96	157

（3）分析与讨论

由表4.3-6可知：SS400、1#材料、2#材料和3#材料的原始铁素体晶粒尺寸由小到大变化，基本满足对试验材料原始铁素体晶粒尺寸梯度分布的要求。

由焊接冶金原理可知：在钢中化学成分一定的条件下，影响奥氏体长大的主要因素是加热的最高温度和高温停留时间。由表4.3-8可以看出：随着原始铁素体晶粒尺寸的逐渐增大，材料的A_{c_3}和A_{r_3}点有明显升高的趋势，这样在同一焊接热循环条件下，就缩短了奥氏体的存在时间，即减少了高温停留时间，从而最终引起奥氏体晶粒粗化程度的减弱。基于此，可以预测在同一热输入条件下，原始铁素体晶粒尺寸越小，奥氏体晶粒会增大。由表4.3-7中两系列的焊接热模拟后的奥氏体晶粒尺寸测试结果，也可基本上说明这种规律。

采用同一焊接规范，对SS400和3#材料施焊得到焊接接头，其$t_{8/5}$为5 s。由于SS400和3#材料的焊接条件和规范完全相同，热影响区的宽度基本相同，所以热影响区的温度梯度就完全相同；于是粗晶区宽的材料，其奥氏体晶粒的粗化温度就低。SS400粗晶区的宽度为1.0 mm，明显大于3#材料粗晶区的宽度0.6 mm。这就说明，随着原始铁素体晶粒尺寸的不断减小，奥氏体晶粒的粗化温度下降。当距熔合线长度相同时，SS400粗晶区的晶粒尺寸稍大于3#材料粗晶区的晶粒尺寸，这说明，试验材料的原始铁素体晶粒尺寸越小，其热影响区粗晶区的奥氏体晶粒尺寸就越大。

由于930℃是稍大于A_{c_3}的温度，因而可以认为随炉升温到930℃立即淬火的奥氏体粒径与初始奥氏体粒径相当。从表4.3-9可以看出，SS400在930℃立即淬火所得的粒径明显小于3#材料，这说明原始铁素体的晶粒尺寸越小，所得到的初始奥氏体的尺寸就越小。

由表4.3-9还可看出，在930℃保温不同时间时，SS400有显著的晶粒长大现象，且晶粒长大速度较快，而3#材料的奥氏体晶粒尺寸，此时基本没有变化，有很好的稳定性；由表4.3-10可以看出，在1 000℃保温不同时间时，SS400的奥氏体晶粒尺寸已达到很大（150 μm），并且随着保温时间的增加，其晶粒尺寸基本不变，3#材料表现出显著的晶粒长大现象，晶粒长大速度较大，这进一步说明了SS400的晶粒粗化温度要比3#材料低，即母材金属中原始铁素体的晶粒尺寸越小，奥氏体晶粒长大的粗化温度越低。

3.1.3　钢的纯净度对热影响区晶粒长大的影响

新一代钢铁材料的一个显著特点是高纯净度，一般认为杂质元素对晶粒长大有拖拽作用，对于高纯净度钢，焊接热影响区晶粒长大倾向与传统钢相比有多少区别是一个敏感问题，但这方面的研究却很少，为此，研究了钢的纯净度对热影响区晶粒长大的影响。

（1）实验材料与实验方法

实验材料为特别冶炼、轧制的三组8 mm厚钢板，在材料基础化学成分不变的前提下，调整O、N、S的含量，三组实验材料的化学成分见表4.3-11。

表4.3-11　实验用钢的化学成分

钢号	C/%	Si/%	Mn/%	$P/10^{-6}$	$Al/10^{-6}$	$S/10^{-6}$	$T.O/10^{-6}$	$N/10^{-6}$
S-10	0.15	0.30	1.41	<10	210	9	28	38
S-20	0.15	0.30	1.30	<10	220	20	20	—
S-30	0.14	0.31	1.38	<10	230	37	19	—
S-50	0.14	0.28	1.33	<10	170	50	21	—
S-100	0.13	0.26	1.33	<10	170	110	19	—
N-10	0.13	0.37	1.30	<10	<100	6	20	10
N-20	0.14	0.36	1.36	<10	<100	12	15	16
N-30	0.12	0.27	1.40	<10	120	12	16	37
N-50	0.14	0.33	1.35	<10	<100	8	17	73
N-100	0.13	0.26	1.32	<10	<100	6	15	120
O-10	0.12	0.30	1.42	<10	240	11	12	40
O-20	0.12	0.27	1.40	<10	180	12	18	—
O-30	0.12	0.22	1.37	<10	140	10	42	—
O-50	0.11	0.17	1.37	<10	150	12	52	—
O-70	0.12	0.28	1.47	<10	100	6	73	—
O-100	0.14	0.26	1.21	<10	100	8	100	—

从三组实验用钢上截取尺寸为10 mm×6 mm×55 mm的试样，在Gleeble 2000试验机上进行焊接热模拟试验，焊接热循环曲线的峰值温度为1 300℃，从800℃到500℃的冷却时间分别为10 s和30 s，来模拟低、高热输入情况下焊接热影响区粗晶区的组织。

将焊接热模拟后的试样剖开，经打磨、抛光、腐蚀制成金相试样，在光学显微镜下采用截线法测量焊接热影响区粗晶区原始奥氏体晶粒尺寸。

利用Formaster－Digital全自动相变仪测定其相变点，用来辅助解释实验结果。

（2）实验结果及讨论

O、N、S的含量对焊接热影响区粗晶区晶粒长大的影响分别示于图4.3-7～图4.3-9，图中$t_{8/5}$为从800℃到500℃的冷却时间。

实验结果表明，随着钢中氧含量的降低，焊接热影响区粗晶区原始奥氏体晶粒尺寸呈现降低的趋势；当N的含量小于73×10^{-6}时，热影响区原始奥氏体晶粒尺寸亦随着N含量的降低而降低；S含量的影响有一个拐点，当S含量高于42×10^{-6}时，热影响区原始奥氏体晶粒尺寸随着S含量的降低而降低，而当S含量低于42×10^{-6}时，热影响区原始奥氏体晶粒尺寸随着S含量的降低而提高。

图4.3-10和图4.3-11分别为O、N含量对临界相变温度的影响。从图4.3-10可见，随着O含量的降低，临界相变温度总体呈现升高的趋势，导致奥氏体相变温度的提升，在相同热循环条件下，奥氏体存在并长大的时间减少，因此奥氏体晶粒尺寸呈现降低的趋势，这样解释与图4.3-7的实验结果相吻合。从图4.3-11可见，A_{c_3}，A_{r_3}，A_{c_1}受N含量的影响不大，但A_{r_1}温度随N含量的降低出现了明显的升高迹



象，同样能解释奥氏体晶粒尺寸随着N含量的降低而降低的现象。

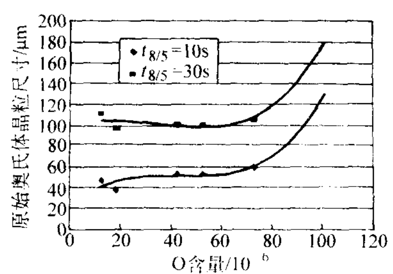


图4.3-7 O含量的影响

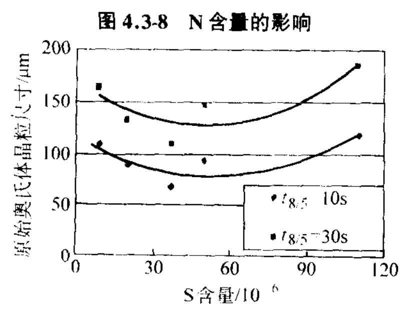


图4.3-8 N含量的影响

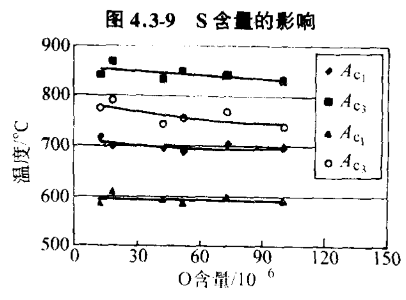


图4.3-9 S含量的影响

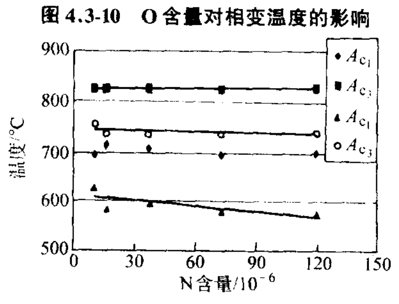


图4.3-10 O含量对相变温度的影响

图4.3-11 N含量对相变温度的影响

总的来说，钢的纯净度的提高阻碍了奥氏体相变，减少了奥氏体晶粒长大的时间，对限制焊接热影响区粗晶区晶粒长大是有利的。

3.1.4 焊接热循环对超细晶粒钢组织的影响

为研究焊接热循环对超细晶粒钢的影响，利用Gleeble-1500焊接热模拟试验机对实验材料进行了焊接热模拟试验。试验设计如下：

1）加热峰值温度固定 T_p = 1 350℃，改变冷却速度 $t_{8/5}$ 从3 s到24 s，模拟在不同焊接热输入条件下热影响区粗晶区的组织和性能。

2）冷却速度固定 $t_{8/5}$ = 5 s，改变峰值温度 T_p 从1 400℃到650℃，模拟在同一焊接热输入条件下，焊接热影响区不同部位的组织和性能。

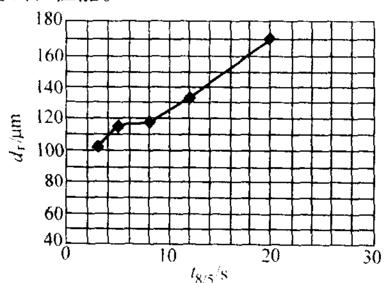


图4.3-12 T_p = 1 350℃时，$t_{8/5}$ 对奥氏体平均晶粒度的影响

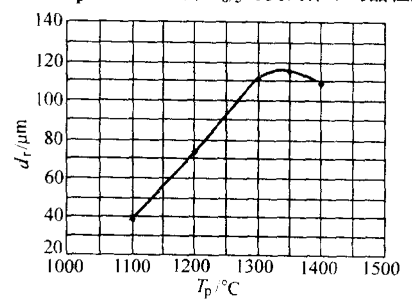


图4.3-13 $t_{8/5}$ = 5 s时，T_p 对奥氏体平均晶粒度的影响

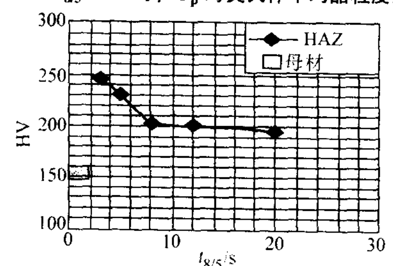


图4.3-14 T_p = 1 350℃时，$t_{8/5}$ 对HAZ硬度的影响

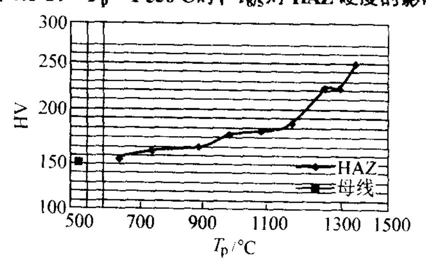


图4.3-15 $t_{8/5}$ = 5 s时，T_p 对HAZ硬度的影响

随着 $t_{8/5}$ 逐渐增加，热影响区粗晶区的原奥氏体粒径不断增加，当 $t_{8/5}$ 大于12 s时，奥氏体粒径大幅度增加。这说明，奥氏体粒径受 $t_{8/5}$ 的影响很大，在条件允许的条件下，应尽可能采用低热输入焊接，加快焊接冷却速率。当 $t_{8/5}$ = 5 s时，随着峰值温度 T_p 的升高，其奥氏体粒径逐渐降低，当 T_p 介于1 100～1 200℃时，奥氏体粒径明显开始粗化，可把这个温度区间作为SS400钢的粗化温度。当 T_p > 1 350℃时，奥氏体晶粒不再继续粗化，而奥氏体晶粒有所减小，这有可能是因为在奥氏体晶界局部熔化导致晶粒尺寸有所减小。

在靠近熔合线的HAZ，奥氏体晶粒易粗化和硬化。由图



4.3-12～图 4.3-15 可以看到：随着 $t_{8/5}$ 增加，热影响区粗晶区的硬度逐渐降低并趋于平稳，当 $t_{8/5}$ = 3 s 时，硬度最大。当 $t_{8/5}$ = 5 s 时，随着峰值温度 T_p 的升高，其显微硬度逐渐增加，当 T_p = 1 400℃时，其硬度达到最大。经 $t_{8/5}$ = 5 s，不同峰值温度的焊接热模拟后，SS400 钢的整个热影响区硬度都不低于母材。于是可以预言：当 $t_{8/5}$ = 5 s 时，SS400 钢的热影响区也不会出现软化。

观察粗晶区（T_p = 1 350℃时）的显微组织，在低热输入条件下，$t_{8/5}$ = 3 s 时，热模拟粗晶区的金相照片中含有大量的马氏体组织。当 $t_{8/5}$ = 5 s、12 s 时，热模拟粗晶区的金相照片中含有大量的下贝氏体 B_L。当 $t_{8/5}$ = 20 s 时，热模拟粗晶区的金相照片中含有大量的上贝氏体 B_U 和侧板条铁素体 FSP。同时，由金相照片可以看出：随着冷却时间的增加，上贝氏体 B_U 的含量越来越多。我们知道，下贝氏体 B_L 和低碳马氏体均有较好的韧性，且 B_L 的韧性优于低碳马氏体，B_U 和侧板条铁素体 FSP 均有很低的韧性。

3.2　400 MPa 级超细晶粒钢板的电弧焊接

（1）试验用钢的基本性能

试验钢采用宝钢工业化生产的热轧板卷，厚度规格为 5 mm、6 mm，化学成分及力学性能见表 4.3-12，屈服强度达到 400 MPa 以上，相对于普通 Q235 碳素钢强度提高一倍；冲击试样 5 mm 钢板采用 4 mm × 10 mm × 55 mm 非标试样；6 mm钢板采用 5 mm × 10 mm × 55 mm 非标试样，在 0～60℃之间冲击韧性基本不下降。金相组织如图 4.3-16 所示，由铁素体 + 珠光体组成，平均晶粒尺寸为 6.5 μm。

表 4.3-12　宝钢试制超细晶粒钢的化学成分及力学性能

C/%	Si/%	Mn/%	P/%	S/%
0.09	0.18	1.14	0.020	0.006

板厚	σ_s/MPa	σ_b/MPa	A_{KV}/J·cm^{-2}		
5 mm	415	510	0℃　88	-40℃　84	-60℃　79
6 mm	450	525	0℃　95	-40℃　94	-60℃　93

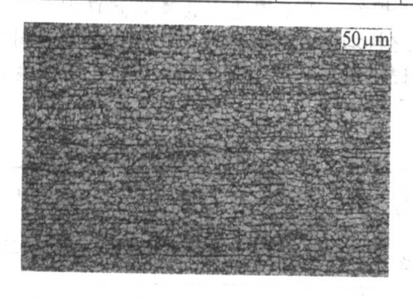


图 4.3-16　宝钢试制超细晶粒钢的组织

（2）超细晶粒碳素钢对焊接材料适应性的研究

屈服强度相当于 400 MPa 的焊接材料有很多种，为了考核 400 MPa 级超细晶粒钢对焊接材料的适应性，选用 AT-YJ502Q 药芯焊丝，BH－J422、BH－J427 焊条；GHS50Cu 实心焊丝、GHY50Cu 药芯焊丝进行了对比试验。

1）试验用焊接材料　各种焊接材料熔敷金属的化学成分列于表 4.3-13，力学性能见表 4.3-14。

2）焊接条件及工艺　焊接试板厚度为 5 mm。采用单面 V 形，60°坡口，钝边 2 mm。焊接过程不预热。

气体保护焊：组对试板间隙 1 mm。为了保证焊接接头熔合良好，不出缺陷，采用双面单道焊，即正面焊满后，反面用角向砂轮打磨清根，至接触正面焊根为止。采用 CO_2 气体保护，对所选用的三种焊丝进行焊接接头力学性能对比试验。采用 Ar + 20% CO_2 气体保护，对 GHS50 焊丝焊接接头力学性能进行对比试验。

表 4.3-13　试验用焊接材料熔敷金属的化学成分

%

牌号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
GHS50 Cu	0.05	0.67	1.53	0.014	0.005	0.33	0.7
GHY50Cu	0.039	0.17	0.87	0.017	0.010	0.34	0.73
AT-YJ502Q	≤0.10	≤0.60	≤1.60	≤0.030	≤0.030	—	—
BH-J422	≤0.12	≤0.25	0.3～0.6	≤0.035	≤0.040	—	—
BH-J427	≤0.12	≤0.90	≤1.25	≤0.035	≤0.040	—	—

表 4.3-14　试验用焊接材料熔敷金属的力学性能

牌号		σ_b/MPa	σ_s/MPa	δ_5/%	A_{KV}/J	
GHS50 Cu ϕ1.2 mm	保证值	≥490	≥390	≥18	-30℃　≥34	
	实测值	575	460	27	-30℃　83	-50℃　47
GHY50Cu ϕ1.2 mm	保证值	≥490	≥390	≥18	-30℃　≥34	
	实测值	490	430	30	-30℃　134	-50℃　42
AT-YJ502Q ϕ1.2 mm	保证值	≥500	≥410	≥22	0℃　≥47	-20℃　≥27
	实测值	570	490	28	0℃　110	-20℃　80
BH-J422 ϕ2.5 mm	保证值	≥420	≥330	≥22	0℃　≥27	
	实测值	470	360	27	0℃　92	
BH-J427 ϕ2.0 mm	保证值	≥420	≥330	≥22	-30℃　≥27	
	实测值	500	375	28	-30℃　125	

手工焊：组对试板间隙 2～2.5 mm。J422 采用双面两道焊，J427 采用双面单道焊，清根方法与气体保护焊相同。

将试板压实在琴键式工作台上，以防止焊接变形。焊缝底部垫有铜条。焊接工艺参数如表 4.3-15。由表 4.3-15 可见，对于不同的焊接材料，最佳焊接工艺匹配有所不同。气体保护焊的焊接线能量基本控制在同一水平（6～8 kJ/cm）。手工焊由于焊条直径的差异，焊接线能量有较大的差别。

表 4.3-15　各种材料焊接接头的焊接工艺参数

焊接材料	焊丝直径/mm	保护气体	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接热输入/kJ·cm^{-1}
GHS50Cu	1.2	CO_2	238	29	7.58
		Ar + 20% CO_2	230	24.6	6.45
GHY50Cu	1.2	CO_2	208	26.2	6.52
AT-YJ502Q	1.2	CO_2	200	26.6	6.22
BH-J422	2.0		80	23	6.78
BH-J427	2.5		80	24	12.83

3）焊接接头的力学性能　焊接试板采用机械方法解剖，分别按 GB2649—1989《焊接接头机械性能试验取样方法》、GB2651—1989《焊接接头拉伸试验方法》、GB/T2653—1989《焊接接头弯曲及压扁试验方法》、GB2650—1989《焊接接头冲击试验方法》的规定加工试样和进行试验。由于试验钢板厚度为 5 mm，且为负公差，因此冲击试样采用 4 mm × 10 mm × 55 mm 的非标试样，缺口分别开在焊缝中心和熔合线处，并将母材也加工成同样尺寸试样，同时进行试验。为了便于比较，冲击结果采用单位面积吸收功表示。

表 4.3-16 各种焊接材料焊接接头的力学性能

焊接材料	接头拉伸		接头冷弯 $d=3a$ 180°		焊缝冲击韧度 /J·cm⁻²		熔合线冲击韧度/J·cm⁻²			
	σ_b /MPa	断位			0℃	-60℃	0℃	-20℃	-40℃	-60℃
母材							85 88 90	87 88 89	77 90 84	77 86 75
							88	88	84	79
GHS50Cu	515 515	母材 母材	正 反	完好 完好	90 88 89	46 37 29	98 104 98	101 83 86	98 63 57	37 43 38
					89	37	100	90	73	39
GHY50Cu	505 505	母材 母材	正 反	完好 完好	109 108 105	54 53 47	94 96 98	93 86 93	56 56 41	36 40 52
					107	51	96	91	51	43
AT-YJ502Q	510 505	母材 母材	正 反	完好 完好	77 107 118	109 61 58	106 93 94	103 100 104	80 61 93	73 56 67
					101	76	98	102	78	65
BH-J422	500 505	HAZ HAZ	正 反	完好 完好	83 50 57	19 22 8	81 57 63	52 43 68	42 72 68	36 44 28
					63	16	67	54	61	36
BH-J427	500 495	HAZ HAZ	正 反	完好 完好	169 128 125	73 9 11	151 89 98	41 84 56	94 117 55	7 21 73
					141	31	113	60	89	34

表中冲击性能横线上为实测值，横线下为平均值。以下各表中相同。

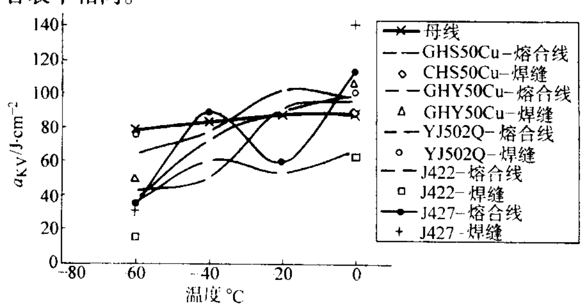


图 4.3-17 各种焊接材料焊缝及熔合线冲击功

表 4.3-16 及图 4.3-17 所示焊接接头力学性能结果表明：

气体保护焊接头拉伸全部断于远离焊缝的母材，其抗拉强度实际就是母材的强度，数据稳定在 505～515 MPa 范围。手工焊两种接头拉伸虽然断于 HAZ，但其数值接近于母材的强度。正、反弯曲完好。可见，本试验所选用的焊接材料与 400 MPa 级超细晶粒碳素钢强度匹配合适。

母材的冲击韧性在 0～-60℃范围内，基本不降低。

焊缝的冲击韧性在 0℃时，除 J422 焊条外，都处于较高水平。在-60℃时，冲击韧性降低较多，两种药芯焊丝的韧性较高些。

熔合线的冲击韧性从 0～-40℃降低缓慢，-60℃时，处于较低水平。同时还可以看到，焊缝低温韧性高的，熔合线的低温韧性也高。熔合线的冲击代表着焊缝与热影响区的综合性能，其中焊缝金属的面积占 50%，因此焊缝金属的韧性对熔合线的韧性会产生较大的影响。选用韧性好的焊接材料，将有助于提高熔合线的冲击韧性，从而提高焊接接头的整体韧性。

4）采用不同保护气体焊接时焊接接头的力学性能 GHS50Cu 焊丝采用 CO_2、Ar+20% CO_2 气体保护焊接时，焊接接头力学性能如表 4.3-17。可见，采用 Ar+20% CO_2 气体保护焊，焊缝的韧性明显高于 CO_2 气体保护焊，从而使熔合线的韧性也有较大幅度的增加。因此选择合适的保护气体也有助于提高熔合线的冲击韧性。

表 4.3-17 GHS50Cu 焊丝不同保护气体焊接接头的力学性能

保护气体	接头拉伸		接头冷弯 $d=3a$ 180°		焊缝冲击韧度/J·cm⁻²		熔合线冲击韧度/J·cm⁻²			
	σ_b /MPa	断位			0℃	-60℃	0℃	-20℃	-40℃	-60℃
CO_2	515 515	母材 母材	正 反	完好 完好	90 88 89	46 37 29	98 104 98	101 83 86	98 63 57	37 43 38
					89	37	100	90	73	39
Ar+20% CO_2	505 505	母材 母材	正 反	完好 完好	166 150 173	134 122 127	105 109 108	93 112 96	62 82 114	77 68 74
					163	128	107	100	86	73

400 MPa 级超细晶粒碳素钢对焊接材料的适应性良好，在强度匹配相当的条件下，可根据用途和使用要求选择相应的焊接材料及焊接工艺方法。

（3）超细晶粒碳素钢对焊接工艺的适应性研究

任何钢种都具有适用的焊接工艺范围。为了研究 400 MPa级超细晶粒钢对焊接工艺的适应性，通过改变焊接热输入来研究焊接接头性能的变化规律。

1）试验用焊接材料　结合实际应用，气体保护焊选用目前国内用量最大的 CO_2 气体保护焊焊丝 ER50-6，相当于 H08Mn2SiA 焊丝。手工焊选用低氢型 J507 焊条。

焊接材料均由大西洋焊接材料股份有限公司生产，其质量证明书提供的化学成分列于表 4.3-18，熔敷金属力学性能列于表 4.3-19。

表 4.3-18 焊接材料的化学成分 %

牌号	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo
CHW-50C6 焊丝	0.086	1.54	0.92	0.015	0.019	0.020	0.022	0.120	—
CHE 507 焊条	0.07	1.27	0.51	0.014	0.017	0.013	0.01	—	0.004

表 4.3-19 焊接材料熔敷金属力学性能

牌号		σ_b/MPa	σ_s/MPa	δ_5/%	a_{kv}/J·cm⁻²	
CHW-50C6 ϕ1.2 mm	保证值	≥500	≥420	≥22	-29℃	≥27
	实测值	545	420	30	-29℃	100
CHE 507 ϕ3.2 mm	保证值	≥490	≥400	≥22	-30℃	≥27
	实测值	550	445	28	-30℃	173

2）焊接工艺　焊接试板厚度为 6 mm。采用单面 V 形，60°坡口，钝边 1.5 mm。焊接过程不预热。

表 4.3-20　焊接工艺参数及接头截面形貌

焊接材料		焊接热输入 /kJ·cm^{-1}	实测 $t_{8/5}$ /s	焊接接头截面形貌
CHW－50C6 ϕ1.2 mm		4.99	4.4	
		8.64	7.5	
		11.78	9.6	
		14.92	11.8	
		20.23	16.1	
CHE 507 ϕ3.2 mm	正面	18.5		
	反面	13.3		

气体保护焊：考虑到在实际产品焊接时，许多部位只能采取单面单道焊，本试验按单面单道焊设计。采用 CO_2 气体保护，组对试板间隙 1.2 mm，将试板压在底部垫有成型铜条的琴键式工作台上进行焊接。焊接热输入在 5～20 kJ/cm 范围内，选用五种规范进行焊接。当热输入为 5 kJ/cm 时，单道焊不能填满坡口，两道焊容易出现咬边，因此采用单面三道焊。其他各规范均为单面单道焊。

手工焊：试图采用单面单道焊，但经过工艺调整，无法实现反面的成形和熔合质量。因此采用双面单道焊。

在气体保护焊时，采用铂－铑热电偶和电子电位差计记录热循环曲线，测出 $t_{8/5}$。焊接工艺参数及焊接接头的实物截面形貌如表 4.3-20。

3) 焊接接头的力学性能　焊接接头拉伸及弯曲试验结果见表 4.3-21，接头的抗拉强度在 515～530 MPa 范围，断裂位置基本都在远离焊缝的母材，只有大热输入及手工焊的拉伸断于热影响区外侧近缝区。由于焊接接头是非均质材料，拉伸结果只有抗拉强度为有效数据，但从接头拉伸应力－应变曲线（图 4.3-18）上可以看到，接头具有明显的屈服点和较大的延伸，屈服强度大于 400 MPa。

表 4.3-21　焊接接头的拉伸和弯曲性能

焊接	q /kJ·cm^{-1}	$t_{8/5}$ /s	接头拉伸		接头弯曲（d = 15 mm）180°	
			σ_b/MPa	拉断位置		
气保焊	4.99 单面焊三道	4.4	525 525	母材 母材	正弯 反弯	完好 完好
	8.64 单面焊一道	7.5	515 520	母材 母材	正弯 反弯	完好 微裂
	11.78 单面焊一道	9.6	530 530	母材 母材	正弯 反弯	完好 完好
	14.92 单面焊一道	11.8	530 525	母材 母材	正弯 反弯	完好 完好
	20.23 单面焊一道	16.1	530 530	近缝 母材	正弯 反弯	完好 完好
手工焊	正面 18.5 反面 13.3		515 520	近缝 近缝	正弯 反弯	完好 完好

注：反弯微裂试样是由于根部熔合不良，使未熔合部分张开造成的。

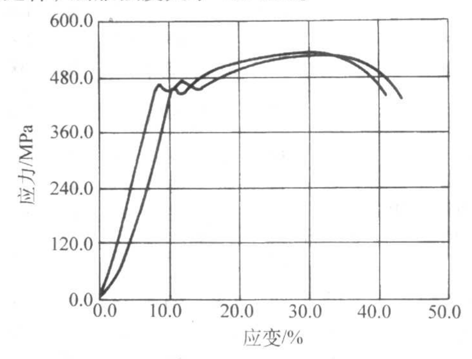


图 4.3-18　焊接接头拉伸应力－应变曲线

冷弯试验按 d = 3a，d 应为 18 mm，因没有 d = 18 mm 的压头，使用 d = 15 mm 的压头进行试验。

冷弯结果表明，只要焊缝熔合无缺陷，就能保证弯曲完好。当接头根部有微小未熔合缺陷时，弯至 180°，只将未熔合部分张开，而没有裂开，说明焊接接头具有良好的塑性。

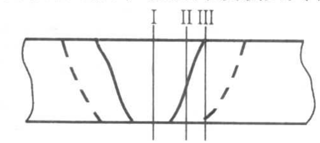


图 4.3-19　焊接接头冲击缺口位置示意图

冲击试样采用 5 mm × 10 mm × 55 mm 的非标试样。缺口位置如图 4.3-19 所示，分别位于焊缝中心（Ⅰ）、熔合线（Ⅱ）、热影响区焊脚熔合线（Ⅲ）。将母材也加工成同样尺寸试样，同时进行试验。冲击试验结果（见表 4.3-22）采用单位面积吸收功表示，并测量冲击断口的平均纤维断面率（表 4.3-23）。

表 4.3-22　焊接接头的冲击性能　J·cm^{-2}

焊接	q /kJ·cm^{-1}	$t_{8/5}$ /s	焊缝冲击		熔合线冲击				热影响区冲击	
			0℃	－40℃	0℃	－20℃	－40℃	－60℃	0℃	－40℃
母材					93 98 93	100 105 103	95 90 98	95 95 90		
					95	103	94	93		
气保焊	4.99 单面焊三道	4.4	123 127 125	45 53 53	98 108 100	68 85 103	43 43 50	30 50 45	93 95 95	95 95 103
			125	50	102	85	45	42	94	98
	8.64 单面单道焊	7.5	60 35 45	28 33 24	80 83 78	75 65 60	45 50 50	38 40 28	105 100 105	53 53 53
			47	28	80	67	48	35	103	53
	11.78 单面单道焊	9.6	60 45 43	30 17 58	63 78 88	70 50 55	43 35 33	25 40 40	100 103 103	55 40 48
			49	35	76	58	37	35	102	48

续表 4.3-22

焊接	q /kJ·cm⁻¹	$t_{8/5}$ /s	焊缝冲击		熔合线冲击				热影响区冲击	
			0℃	-40℃	0℃	-20℃	-40℃	-60℃	0℃	-40℃
气保焊	14.92 单面单道焊	11.8	55	38	58	33	45	35	105	60
			48	38	75	63	60	43	108	58
			45	28	85	55	35	20	100	50
			49	35	73	50	47	33	104	56
	20.23 单面单道焊	16.1	63	38	70	68	55	28	115	70
			58	33	98	43	45	43	113	73
			63	40	63	48	48	45	100	70
			61	37	77	53	49	39	109	71
手工焊	正面 18.5 反面 13.3		105	58	108	90	78	50	108	78
			160	50	118	123	68	35	108	56
			155	88	125	83	75	60	110	93
			140	65	117	99	74	48	109	76

表 4.3-23 焊接接头冲击断口纤维断面率测定结果

%

焊接	q /kJ·cm⁻¹	$t_{8/5}$ /s	焊缝		熔合线				热影响区	
			0℃	-40℃	0℃	-20℃	-40℃	-60℃	0℃	-40℃
母材					100	100	100	100		
气保焊	4.99	4.4	100	41	92	72	32	17	98	100
	8.64	7.5	46	22	62	48	30	18	100	49
	11.78	9.6	45	22	69	43	22	16	96	59
	14.92	11.8	44	23	59	40	26	17	100	62
	20.23	16.1	47	19	54	34	20	13	88	58
手工焊	正面 18.5 反面 13.3		85	35	79	69	47	25	100	58

母材的冲击韧性与 5 mm 板相同，在 0～-60℃范围内基本不降低，断口的纤维断面率均为 100%。韧性水平略高于 5 mm 板。

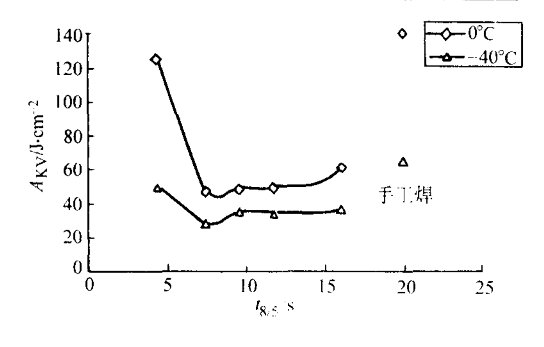
作图表示各部位冲击试验结果随 $t_{8/5}$ 的变化，可以直观地反映其变化规律。

图 4.3-20 为焊缝冲击试验结果随 $t_{8/5}$ 的变化，在单道焊条件下（$t_{8/5}$ 为 7.5～16.1 s）焊缝冲击韧性较低，都处于同一水平，基本不随 $t_{8/5}$ 变化。$t_{8/5}$ 为 4.4 s 条件下焊接了三道，其 0℃的韧性明显提高，但在 -40℃时明显降低；手工焊焊接了两道，其韧性也明显提高。冲击断口的纤维断面率随 $t_{8/5}$ 的变化与冲击性能的变化规律相同，从数值上看，除了 $t_{8/5}$ 为 4.4 s 和手工焊的焊缝在 0℃时的纤维断面率高于 50% 外，多数焊缝断口的纤维断面率低于 50%，属于脆性断口。对照生产厂提供的性能数据，说明此类焊接材料经过焊道间热循环的作用，有助于改善焊缝韧性。

图 4.3-21 为熔合线冲击试验结果随 $t_{8/5}$ 的变化，在 0℃和 -20℃，熔合线的冲击韧性随着 $t_{8/5}$ 的增加呈下降趋势；在 -40℃和 -60℃，熔合线的冲击韧性基本不随 $t_{8/5}$ 变化。熔合线的冲击韧性受焊缝金属韧性的影响，焊缝金属韧性较高时，熔合线的韧性也较高。冲击断口的纤维断面率也表现出同样的规律，0℃时纤维断面率都高于 50%，-20℃时，大多数断口的纤维断面率低于 50%，表现出脆性倾向。在所试验的条件下，熔合线的韧性一般不低于焊缝的韧性，说明 400 MPa 级超细晶粒碳素钢具有良好的焊接工艺适应性。

图 4.3-22 为热影响区冲击试验结果与 $t_{8/5}$ 的关系，在 0℃，HAZ 的韧性不受 $t_{8/5}$ 的影响；在 -40℃时，$t_{8/5}$ 为 7.5～12 s 范围内韧性较低。0℃时，冲击断口的纤维断面率基本在 90% 以上；-40℃时，都大于 50%。比熔合线的冲击韧性有明显的改善。

-40℃冲击断口的典型形貌如图 4.3-23 所示，母材冲击断口发生了较大的塑性变形，中部为木材状纤维断口。焊缝冲击断口基本未发生塑性变形，为结晶状断口，并具有明显



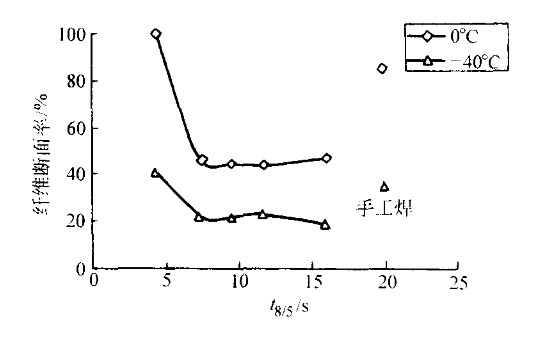
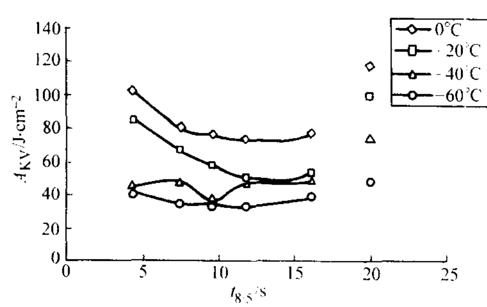


图 4.3-20 焊缝金属冲击性能与 $t_{8/5}$ 的关系



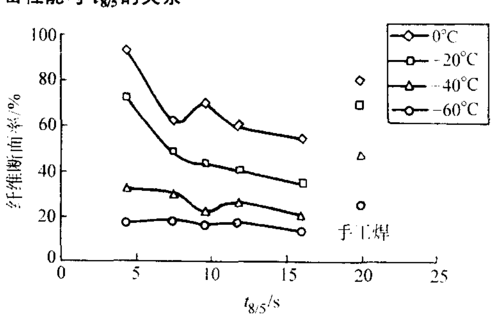
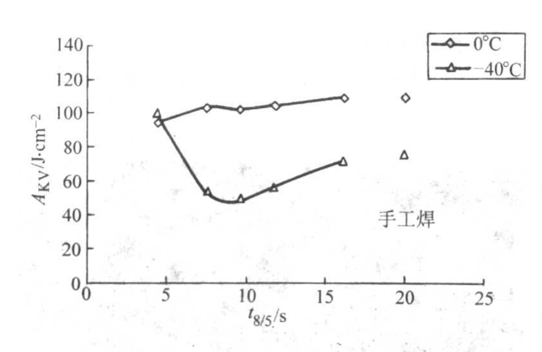


图 4.3-21 熔合线冲击性能与 $t_{8/5}$ 的关系



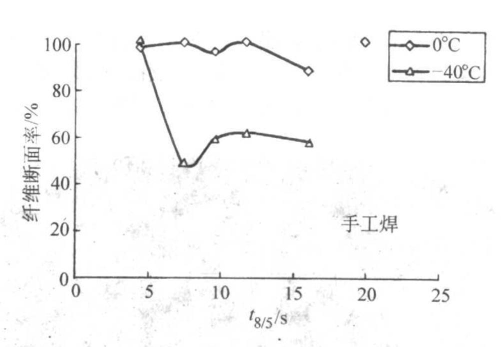
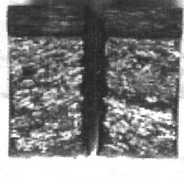


图 4.3-22 热影响区冲击性能与 $t_{8/5}$ 的关系


母材


焊缝

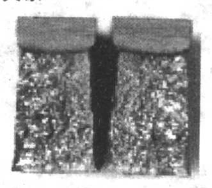

熔合线

图 4.3-23 －40℃冲击断口的典型宏观形貌

的柱状晶方向性。熔合线冲击断口有较小的塑性变形，也为结晶状断口，可以看到在焊缝一侧具有柱状晶方向性，HAZ 一侧为细小的结晶状形貌。

4）焊接材料对比试验 为了证实 3）中熔合线的冲击韧性低是受焊缝金属影响的结论，采用钢铁研究总院研制的 GHS50Cu 焊丝，以与 CHW－50C6 焊丝在相同热输入（11.78 kJ/cm）条件下进行试验，得到性能结果列于表 4.3-24、表 4.3-25。

表 4.3-24 两种焊丝对比试验结果

焊丝	接头拉伸		接头弯曲 $d=15$ mm 180°		焊缝冲击韧度		熔合线冲击韧度/J·cm^{-2}			
	σ_b /MPa	断位			0℃	－40℃	0℃	－20℃	－40℃	－60℃
CHW－50C6	530	母材	正	完好	60	30	63	70	43	25
	530	母材	反	完好	45	17	78	50	35	40
			反	完好	43	58	88	55	33	40
					49	35	76	58	37	35
GHS50Cu	515	母材	正	完好	105	60	95	70	78	25
	520	母材	反	完好	100	43	98	88	75	58
			反	完好	80	53	83	85	43	63
					95	52	92	81	65	49

表 4.3-25 两种焊丝对比冲击断口纤维断面率测定结果 %

焊丝	q /kJ·cm^{-1}	焊缝冲击断口		熔合线冲击断口			
		0℃	－40℃	0℃	－20℃	－40℃	－60℃
CHW－50C6	11.78	50	26	64	54	23	14
		40	15	68	40	24	19
		45	26	74	36	19	15
		45	22	69	43	22	16
GHS50Cu	11.78	91	52	73	61	52	34
		90	48	73	62	58	43
		68	50	63	65	41	42
		83	50	70	63	50	40

很显然，在相同的焊接条件下，焊缝金属冲击韧性高的，熔合线的冲击韧性也高。GHS50Cu 焊丝的焊缝金属和熔合线冲击断口的纤维断面率，在－40℃时，仍能达到 50%。因此，选择性能好的焊接材料，才能提高焊接接头的整体性能。

5）焊接接头硬度分布 对各种规范的焊接接头从焊缝到母材测试 HV 硬度分布，画出硬度分布曲线如图 4.3-24 所示。在试验的焊接工艺条件下，焊接接头的硬度处在一个散带范围内，硬度分布的趋势相同。焊缝硬度处于较高水平，从熔合线到母材硬度逐渐降低。

在热影响区中，靠近熔合线硬度最高，靠近母材的再结晶区，硬度略低于母材，有一定程度的软化。将热影响区的硬度分布特征参数统计列于表 4.3-26，可见，CO_2 焊热影响区的最高硬度和最低硬度变化幅度不大，手工焊时的硬度较低。最低硬度与母材平均硬度的比值在 0.93～0.97 范围内，不随 $t_{8/5}$ 变化，但 HAZ 及其软化区的宽度随着 $t_{8/5}$ 的增加而增加。手工焊时软化区的宽度最宽。

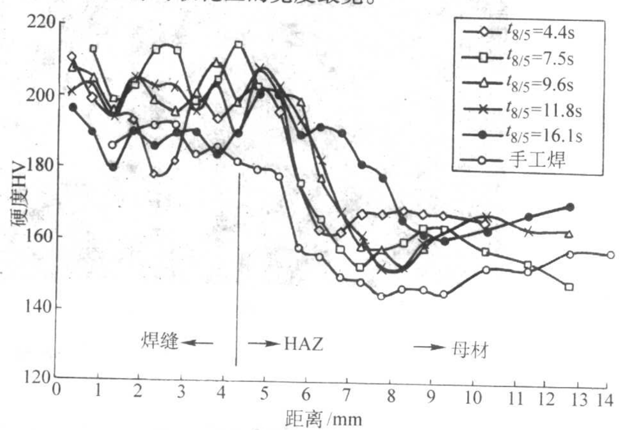


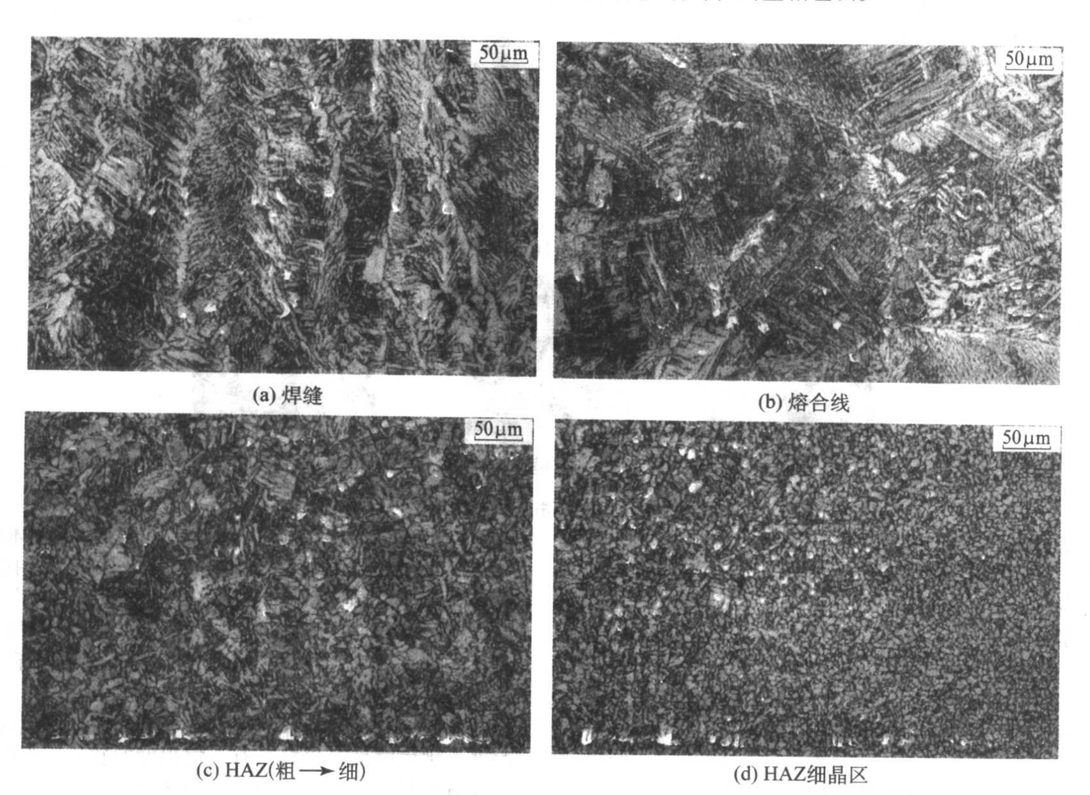
图 4.3-24 焊接接头硬度分布

表 4.3-26 热影响区硬度分布特征参数

$t_{8/5}$ /s	HAZ 最高硬度 HV	HAZ 最低硬度 HV	HAZ 最低硬度/母材平均硬度	HAZ 宽度 /mm	HAZ 中软化区宽度 /mm
4.4	203	163	0.97	2.5	0.5
7.5	215	153	0.97	3.5	1.0
9.6	208	153	0.93	4.5	1.5
11.8	208	153	0.93	4.5	1.5
16.1	201	159	0.95	6.0	2.0
手工焊	180	145	0.94	5.5	3.0

与焊接接头拉伸试验结果对照，当软化区的宽度大于1.5 mm时，接头拉伸断于软化区，但由于软化区的硬度比母材的硬度降低幅度小于10%，其断裂强度不低于断在母材试样的强度。

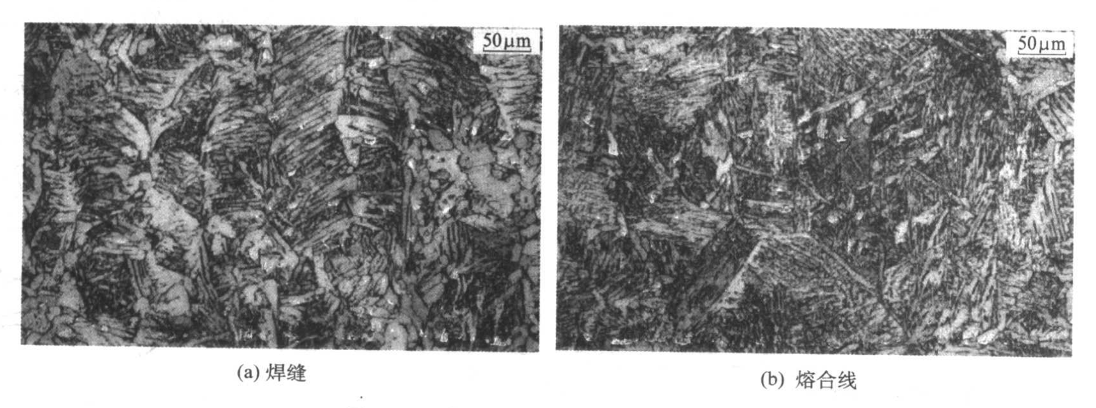
6）焊接接头的金相组织　图4.3-25～图4.3-27所示为焊接接头各部位的金相组织。



(a) 焊缝　(b) 熔合线

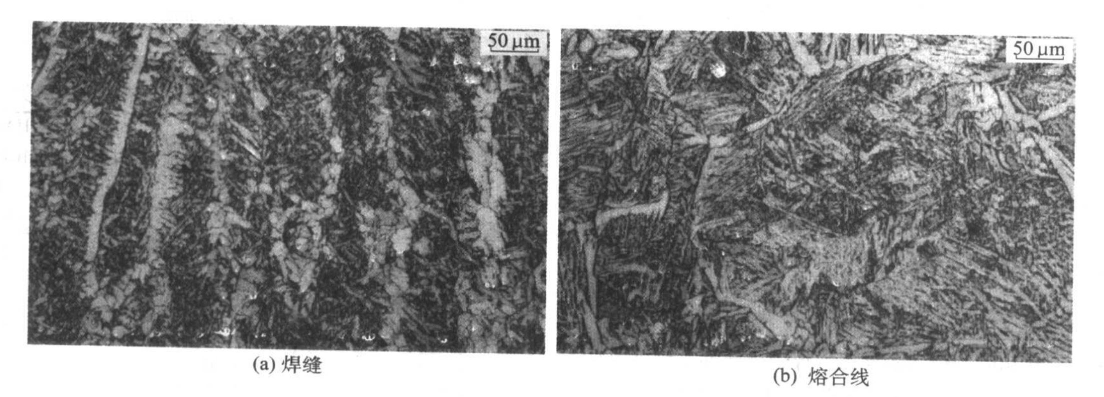
(c) HAZ(粗⟶细)　(d) HAZ细晶区

图4.3-25　焊接接头金相组织（$t_{8/5}=7.5$ s）



(a) 焊缝　(b) 熔合线

图4.3-26　焊接接头金相组织（$t_{8/5}=16.1$ s）



(a) 焊缝　(b) 熔合线

图4.3-27　焊接接头金相组织（手工焊）



焊缝柱晶区的组织由沿柱状晶界分布的先共析铁素体+块状铁素体+侧板条铁素体+针状铁素体组成，随着 $t_{8/5}$ 的增加，块状铁素体和侧板条铁素体数量增加，组织粗化。手工焊焊缝中侧板条铁素体很少，针状铁素体较多，这是其韧性好的原因。

熔合线外粗晶区组织由少量晶界铁素体+侧板条铁素体+针状铁素体组成。在试验的焊接工艺范围内，随着 $t_{8/5}$ 的增加，奥氏体晶粒长大，组织粗化，HAZ 宽度增加，但基本组织形貌不变。这与熔合线的韧性及 HAZ 硬度分布趋势不随 $t_{8/5}$ 变化的结果相吻合。同时也说明 HAZ 的性能主要取决于二次组织形态，而与奥氏体晶粒尺寸关系不大。

从熔合线向外，HAZ 组织由粗到细，晶界铁素体和侧板条铁素体逐渐减少并消失，块状铁素体和珠光体出现并增多。

(4) 模拟焊接热影响区试验

根据实测的热循环曲线，设计模拟焊接热循环参数，峰值温度为 1 350℃，800℃至 500℃冷却时间 $t_{8/5}$ 分别为 3、6、10、15、20、40 s，用以研究在不同焊接热输入条件下热影响区粗晶区的组织和性能。

① 模拟焊接热影响区粗晶区韧性　试验钢板厚度为 6 mm，将热模拟后的试样加工为 5 mm×10 mm×55 mm 冲击试样，冲击试验结果见表 4.3-27 及图 4.3-28。

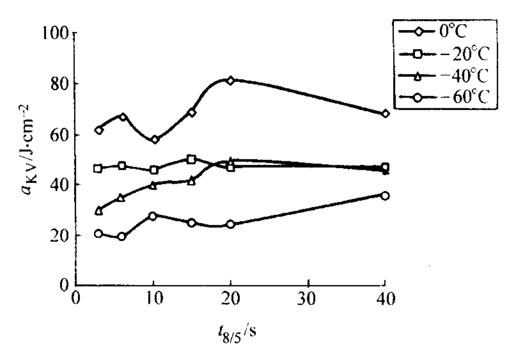
表 4.3-27　模拟焊接热影响区粗晶区的冲击性能

$t_{8/5}$	0℃		-20℃		-40℃		-60℃	
	a_{KV}/J·cm^{-2}	%	a_{KV}/J·cm^{-2}	%	a_{KV}/J·cm^{-2}	%	a_{KV}/J·cm^{-2}	%
3 s	53，63，71	57	48，45，48	51	30，43，17	30	11，21，30	19
	62		47		30		21	
6 s	55，65，80	62	53，40，50	34	28，38，40	22	17，19，24	15
	67		48		35		20	
10 s	58，55，60	44	45，48，45	26	30，43，48	23	30，33，20	16
	58		46		40		28	
15 s	70，70，65	43	53，45，53	27	45，40，40	21	25，35，15	14
	68		50		42		25	
20 s	68，105，70	47	45，55，40	26	50，50，48	21	30，33，10	11
	81		47		49		24	
40 s	65，83，55	47	50，50，40	26	55，40，43	20	43，25，40	16
	68		47		46		36	
母材	108，98，100	100	98，90，95	100	98，95，90	100	93，90，93	100
	102		94		94		92	

注：表中“%”列的数据为冲击断口的纤维断面率。

结果表明随着试验温度的降低，模拟焊接热影响区粗晶区的冲击韧性逐渐下降，相对于母材，低温韧性有较大幅度降低。但在 $t_{8/5}$ 为 3～40 s 的范围内，冲击韧性维持在同一水平，这与实际焊接接头中，CO_2 单道焊时熔合线的冲击结果相吻合，并且韧性水平也相当。说明超细晶粒碳素钢适用的焊接热输入范围非常宽。

冲击断口纤维率在 $t_{8/5}$ 为 3、6 s 时略高，$t_{8/5}$ 为 10～40 s 时也维持在同一水平。从数值上看，大多数断口的纤维断面率低于 50%，这与 2～3 mm 厚度钢板的性能结果不同，表现出了明显的脆性倾向。因此，当钢板的厚度增加时，超细晶粒碳素钢焊接热影响区粗晶区脆化问题，有待于进一步研究解决。



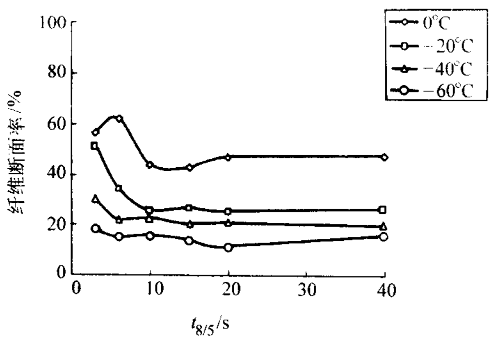


图 4.3-28　模拟粗晶区冲击性能与 $t_{8/5}$ 的关系

② 冷却速度对相变温度的影响　由于焊接热循环过程的冷却速度很快，使得被焊材料发生了非平衡相变。在进行热模拟试验的同时，利用热膨胀仪测定了相应的奥氏体冷却转变相变温度（图 4.3-29）。当 $t_{8/5}$ 增加（即冷却减慢）时，相变温度升高，相变温度区间减小。$t_{8/5}$ 由 40 s 增加到 3 s，相变开始温度升高约 100℃，相变结束温度升高约 150℃。这将对冷却转变产物产生影响。

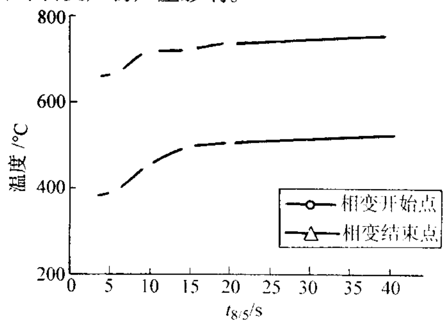


图 4.3-29　奥氏体冷却转变相变温度与 $t_{8/5}$ 的关系

③ 模拟焊接热影响区粗晶区金相组织　模拟不同热输入焊接所产生的具有不同 $t_{8/5}$ 的热影响区粗晶区的金相组织如图 4.3-30 所示。当 $t_{8/5}$ 为 3 s 时，主要由贝氏体和少量马氏体组成，贝氏体中铁素体板条非常细密，析出的碳化物较细小；当 $t_{8/5}$ = 6 s 时，原奥氏体晶界有先共析铁素体析出，随着 $t_{8/5}$ 继续增大，出现侧板条铁素体和针状铁素体，并且铁素体板条间距加宽，碳化物较粗大，各种组织明显粗化。

④ 模拟焊接热影响区硬度　模拟焊接热影响区粗晶区的平均硬度随 $t_{8/5}$ 的变化如图 4.3-31 所示。可见热影响区粗晶区的硬度受 $t_{8/5}$ 的影响明显，$t_{8/5}$ 从 3 s→15 s，硬度迅速降低，之后随着 $t_{8/5}$ 的增加，硬度趋于缓慢降低。所有试验的条件下，热影响区粗晶区的硬度都高于母材的硬度。

⑤ 热循环高温停留时间对粗晶区组织和性能的影响　描述焊接热输入的大小通常采用焊接线能量或 $t_{8/5}$ 来表示，更多的是以 $t_{8/5}$ 作为热循环的特征参数。实际上一个完整的热循环应包括两部分：奥氏体区（高温区）和相变区。

(a) $t_{8/5}$ =3s

(b) $t_{8/5}$ =6s

(c) $t_{8/5}$ =10s

(d) $t_{8/5}$ =15s

(e) $t_{8/5}$ =20s

(f) $t_{8/5}$ =40s

图 4.3-30　模拟焊接热影响区粗晶区组织

通常所说的 HAZ 晶粒长大是指奥氏体晶粒的大小。为了探究影响超细晶粒碳素钢 HAZ 最终组织和性能的究竟是高温区停留时间还是相变区停留时间，设计了一组热循环：峰值温度为 1 350℃，$t_{8/5}$ 为 10 s 不变，根据实测的相变温度，以 800℃以上作为高温区，改变 800℃以上的停留时间，使之与 $t_{8/5}$ 分别为 3 s、10 s、20 s 时正常热循环的高温停留时间相同。

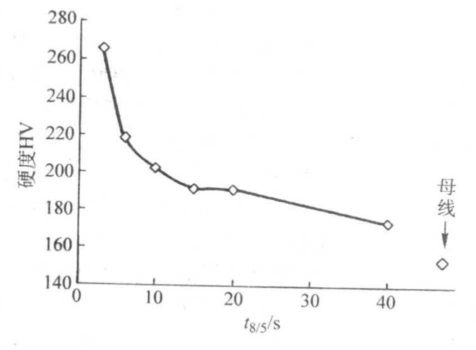


图 4.3-31　粗晶区硬度与 $t_{8/5}$ 的关系

图 4.3-32 为不同热循环高温停留时间的粗晶 HAZ 金相组织。可以看到，随着高温停留时间增大，原奥氏体晶粒明显增大，但最终转变组织的形貌没有变化。采用面积法测定奥氏体平均晶粒尺寸（图 4.3-33），可见，$t_{8/5}$ 不变与 $t_{8/5}$ 变化时，奥氏体平均晶粒尺寸随高温停留时间的变化是一致的。由此表明：热循环中高温区停留时间决定了奥氏体晶粒尺寸大小，相变区的冷却速度决定了最终组织的形貌。

硬度 HV 测试结果（图 4.3-34）表明，当 $t_{8/5}$ 变化时，粗晶热影响区的硬度随高温停留时间的增加而降低；当 $t_{8/5}$ 不变时，粗晶热影响区的硬度不随高温停留时间变化。因此，高温停留时间（即奥氏体晶粒尺寸）不影响粗晶热影响区的硬度（即强度）。

将热模拟后的试样加工成 5 mm × 10 mm × 55 mm 冲击试样，从冲击试验结果（见表 4.3-28）可以认为高温停留时间（即奥氏体晶粒尺寸）基本上不影响粗晶热影响区的韧性。

（5）热影响区粗晶区奥氏体晶粒尺寸与焊接热输入的关系

采用面积法分别测定了不同焊接热输入条件下，模拟焊接热影响区粗晶区和实际焊接接头熔合线外 5 ~ 8 个晶粒范



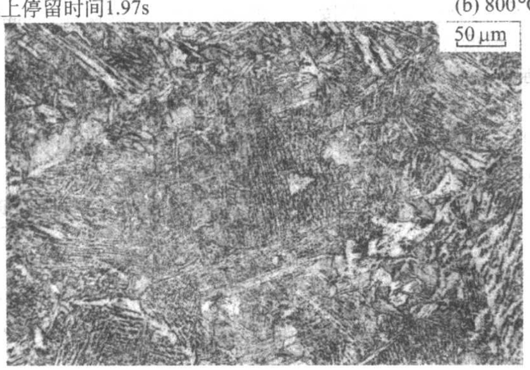
围内热影响区粗晶区的奥氏体平均晶粒尺寸。模拟热影响区的晶粒大小比较均匀，容易测定；实际接头热影响区晶粒大小差别很大，通常在钢板上下表面处晶粒尺寸比较小，板厚中部的晶粒尺寸则很大，为了测量结果的准确性，沿焊缝两侧的熔合线，从钢板上表面到下表面进行了扫描式测量，取得平均值。测定结果见图4.3-35。



(a) 800℃以上停留时间1.97s



(b) 800℃以上停留时间6.03s



(c) 800℃以上停留时间15.32s

图4.3-32 不同高温停留时间的粗晶区组织

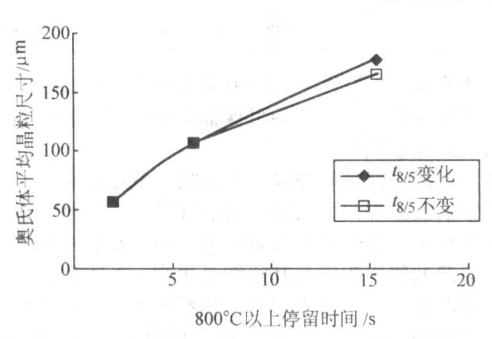


图4.3-33 奥氏体晶粒尺寸与高温停留时间的关系

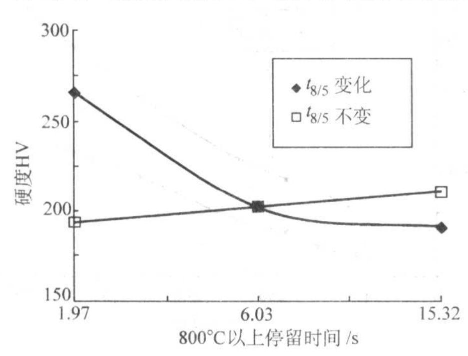


图4.3-34 粗晶热影响区的硬度与高温停留时间的关系

实际焊接接头热影响区与模拟热影响区的晶粒长大规律十分相近，在焊接热输入低于15 kJ/cm范围，即800℃以上停留时间<8 s时，随着热输入的增加，奥氏体晶粒尺寸迅速长大；当焊接热输入大于15 kJ/cm后，随着热输入的增加，奥氏体晶粒尺寸长大趋势减小。

在试验的热输入范围内，800℃以上停留时间由1.98 s增加到15.34 s，奥氏体平均晶粒尺寸由55 μm增加到245 μm，可见奥氏体晶粒长大速度之快。但这并没有引起热影响区硬度和韧性的明显变化，因此超细晶粒碳素钢焊接热影响区奥氏体晶粒长大，不是决定热影响区性能的主要因素。

表4.3-28 高温停留时间不同时粗晶区的韧性

800℃以上停留时间/s	0℃		−20℃		−40℃		−60℃	
	a_{KV}/J·cm^{-2}	%	a_{KV}/J·cm^{-2}	%	a_{KV}/J·cm^{-2}	%	a_{KV}/J·cm^{-2}	%
1.97	75，70，68	56	38，28，38	41	25，33，48	20	25，13，20	15
	71		35		35		19	
6.03	58，55，60	44	45，48，45	26	30，43，48	23	30，33，20	16
	58		46		40		28	
15.32	45，63，50	43	50，53，45	29	40，30，45	22	25，25，30	15
	53		49		38		27	

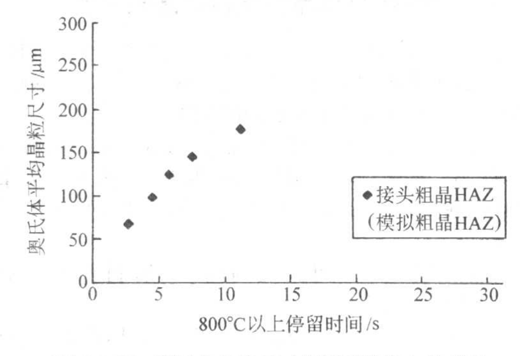


图4.3-35 奥氏体晶粒尺寸与焊接热输入的关系



从以上试验研究，可以看出：

1）宝钢工业试制的超细晶粒碳素钢原始铁素体晶粒尺寸为6.5 μm，经过焊接热循环的作用，在热影响区的粗晶区奥氏体晶粒明显长大，晶粒尺寸的大小与奥氏体化温度区间的停留时间密切相关，随着焊接热输入的增加，高温停留时间增加，奥氏体晶粒尺寸增大。当800℃以上停留时间由1.98 s增加到15.34 s时，奥氏体平均晶粒尺寸由55 μm增加到245 μm。

2）在较大的焊接热输入（5～20 kJ/cm）范围内，实际焊接接头的抗拉强度为515～530 MPa，屈服强度大于400 MPa，断裂位置基本都在远离焊缝的母材。硬度分布测试结果表明，热影响区中靠近熔合线的硬度最高，最高硬度与母材平均硬度的差距不大，因此热影响区的淬硬性倾向很小；在HAZ外侧的再结晶区存在局部软化区，软化区的宽度随焊接热输入的增加而变宽，当软化区宽度较大时，焊接接头拉伸时断在软化区。但由于软化区的最低硬度比母材的平均硬度降低幅度小于10%，其断裂强度不低于断在母材试样的强度。焊接接头冷弯及拉伸应力－应变曲线记录结果都表明焊接接头具有良好的塑性。焊接接头中焊缝、熔合线及热影响区的冲击韧性（$t_{8/5}$在4～16 s范围）以及模拟焊接热影响区粗晶区的冲击韧性（$t_{8/5}$在3～40 s范围）不受$t_{8/5}$的影响。

以上结果表明：400 MPa级超细晶粒碳素钢对焊接工艺的适应性良好。因此在选择焊接工艺时，首先要满足强度的要求，在焊接接头强度不低于母材强度的前提下，可适用于很宽的焊接热输入范围。

3）400 MPa级超细晶粒碳素钢可与多种强度级别相当的焊接材料相匹配，从而获得优良的焊接接头。熔合线的冲击韧性受焊缝的韧性及焊接方法的影响，用户可根据用途和使用要求，选择韧性好的焊接材料，采用富氩气体保护焊接或采用多道焊的方式，有助于提高超细晶粒钢焊接接头熔合线的冲击韧性，从而改善焊接接头的整体韧性。

4）随着焊接热输入的增加，冷却速度减小（即$t_{8/5}$增加），奥氏体冷却转变温度提高，从而影响了其转变产物的形貌。当$t_{8/5}=3$ s时，转变产物为贝氏体和少量马氏体、析出的碳化物较细小；当$t_{8/5}=6$ s时，原奥氏体晶界有先共析铁素体析出，随着$t_{8/5}$继续增大，出现侧板条铁素体和针状铁素体，并且铁素体板条间距加宽，碳化物较粗大，各种组织明显粗化。

5）在热影响区的粗晶区，虽然奥氏体晶粒尺寸随着焊接热输入的增加而明显长大，但其性能并不取决于奥氏体晶粒尺寸的大小，而主要取决于所形成的不平衡组织的形态。随着$t_{8/5}$的增加，粗晶区的硬度降低，但不低于原始母材的硬度；各温度的冲击韧性基本不随$t_{8/5}$变化。但大多数冲击断口的纤维断面率低于50%。

3.3 400 MPa级超细晶粒钢板的激光焊接

激光焊是以高功率聚焦的激光束为热源，熔化材料形成焊接接头的优质高效焊接方法。目前激光深熔焊在国际上已被越来越广泛地应用于重要的焊接结构生产中。

由于激光束聚焦后光斑小（0.1～0.3 mm），热源集中，功率密度高，比电弧焊（10^2～10^4 W/cm^2）高几个数量级，用于热敏感的新一代钢铁材料焊接，将具有如下两个显著特点。

1）热影响区窄，高温停留时间短，有利于减小晶粒长大倾向和接头软化；

2）加热冷却速度快（$T_{8/5}$短），焊缝和热影响区会产生与母材显著不同的非平衡态组织。

焊接接头的力学性能将决定于上述两方面因素综合影响的结果。

3.3.1 焊接线能量对热影响区的影响

（1）激光焊接工艺及其焊接线能量

试验所用的超细晶粒碳素钢为屈服强度400 MPa级的SS400钢，厚度有3 mm和5 mm两种（无特别说明者，以下试验均指3 mm钢板）。激光焊接采用CO_2激光器，激光束模式为$TEM_{00}+TEM_{01}$，聚焦镜焦长127 mm，光斑直径0.2 mm，Ar气保护熔池，不加填充焊丝。

表4.3-29表示以不同的激光功率对3 mm厚碳素钢进行焊接时，为保证一次焊透单面焊双面成形所需的焊接规范组合及相应的线能量，并和传统的等离子弧焊、MAG焊进行了对比。

试验表明，采用5 000～2 000 W的CO_2激光配以相应的焊接速度，均可保证3 mm厚钢板一次焊透，获得良好的成形。由于激光功率密度大，所需的线能量比传统电弧焊所需的线能量小得多。而且所用的激光功率越大，允许的焊接速度越快，所需的线能量越小。在正常的激光焊接规范范围内，所需焊接线能量为86～158 J/mm，仅为等离子弧焊和MAG焊的1/9～1/6。

表4.3-29 3 mm厚碳素钢焊接规范（一次焊透）

焊接方法	焊接规范	线能量/J·mm^{-1}
激光焊	1 P = 2 100 W，V = 0.8 m/min	158
	2 P = 2 400 W，V = 1.0 m/min	144
	3 P = 3 500 W，V = 1.6 m/min	131
	4 P = 5 000 W，V = 3.5 m/min	86
等离子弧焊	I = 115 A，U = 28 V，V = 0.25 m/min	773
MAG焊	I = 200 A，U = 26 V，V = 0.4 m/min	780

对于5 mm厚钢板，用3 000 W以下的CO_2激光，以单面焊或双面焊接两种方式，均可保证焊透、获得良好成形。后者所需的线能量较小。

（2）焊接线能量对焊缝、热影响区宽度的影响

热影响区是焊接接头的最薄弱环节，它的宽窄也是影响焊接接头整体力学性能的重要因素。因为热影响区宽度主要由焊接热源的集中程度及其线能量决定，这方面激光焊的优势也十分明显。表示激光焊缝、热影响区宽度与线能量关系的实验结果如图4.3-36所示，其中虚线标出的200 J/mm是

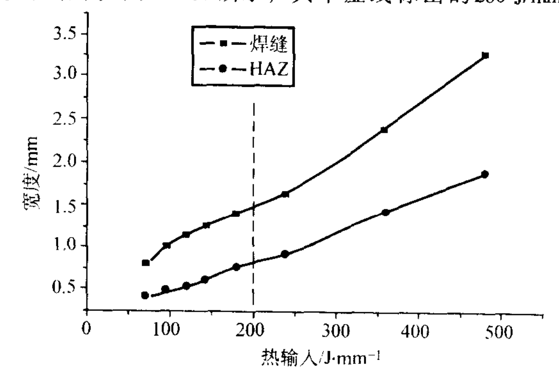


图4.3-36 焊缝、热影响区宽度与激光焊接线能量的关系

（3 mm钢板正常激光焊接的线能量 < 200 J/mm）

指由3 mm钢板激光焊接保证一次熔透焊缝成形正常所需的最大线能量范围，超过此范围的焊接实验是为了充分显示大范围变化线能量的影响而特别设计的非正常成形焊接。由图可见，焊缝和热影响宽度随激光焊接线能量的增加而增加。由于激光热源集中，而且所需的线能量小，焊缝和热影响区

都很窄。在正常的焊接规范范围内（< 200 J/mm），焊缝宽度在 0.7 ~ 1.4 mm 范围内变化，而热影响区宽度最小只有 0.3 mm，一般为 0.55 ~ 0.70 mm。同样熔深条件下，等离子弧焊热影响区宽度为 3.4 ~ 4.6 mm，MAG 焊热影响区宽度为 3.8 ~ 6.8 mm，差别十分明显，如图 4.3-37 所示。

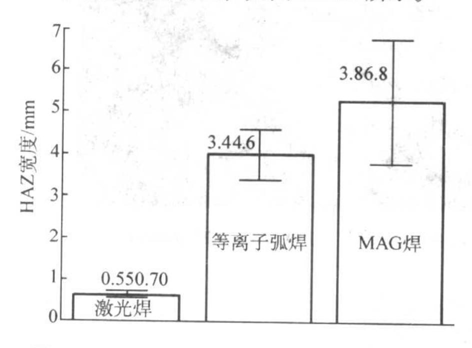


图 4.3-37 三种焊接方法热影响区宽度比较图

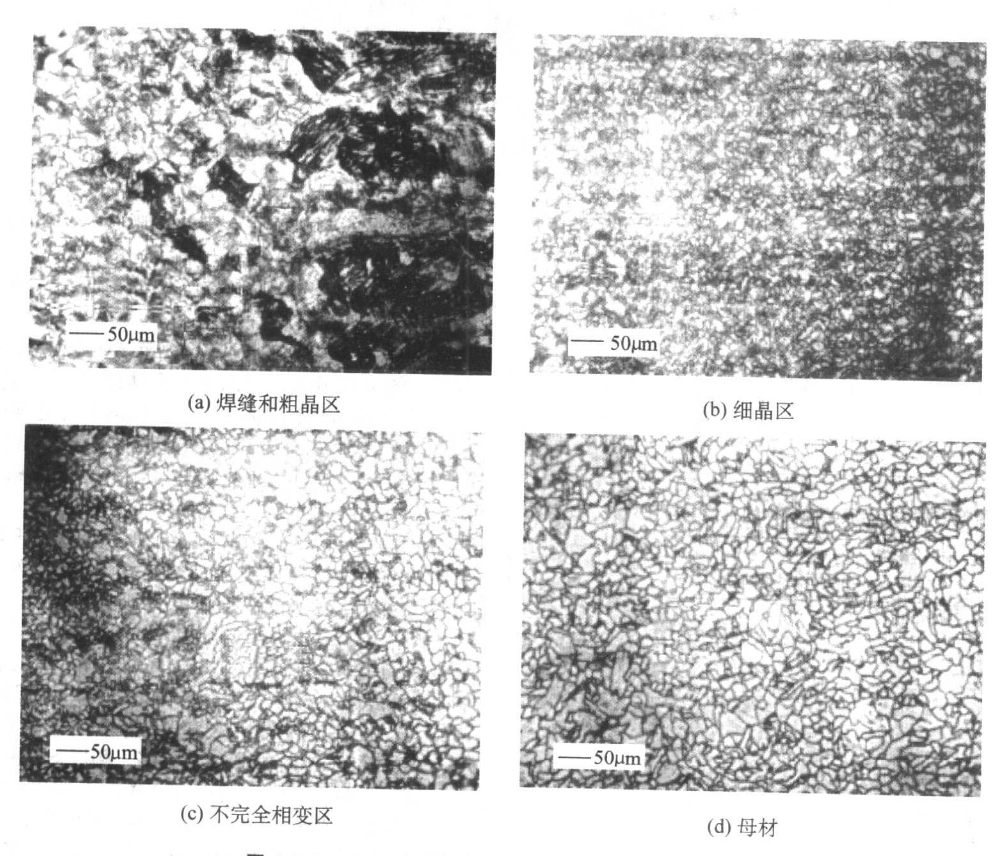
继续增大激光焊接线能量至 480 J/mm，焊缝和热影响区宽度将分别达到 3.2 mm 和 1.8 mm。这是正常激光焊接应避免的情况。

3.3.2 激光焊接接头的晶粒长大

研究采用的 3 mm 厚 SS400 超细晶粒碳素钢的化学成分如表 4.3-3 所示。这种超细晶粒钢利用轧制时形变诱导相变细化铁素体晶粒，并不含有能抑制晶粒长大的碳、氮化物形成元素，而且原始晶粒度越小，在焊接热循环作用下晶粒长大的驱动力越大，因此用普通电弧焊方法，接头热影响区粗晶区晶粒长大倾向将十分严重。采用激光焊接 SS400 超细晶粒钢，线能量小，加热和冷却速度很快，粗晶区高温停留时间很短，可有效地减小晶粒长大倾向。

图 4.3-38 表示以 3 500 W 和 1.6 m/min 规范（线能量 131 J/mm）激光焊接后接头各区域晶粒大小的照片。由图可见，与母材原始奥氏体晶粒比较，焊缝和粗晶区晶粒虽然不可避免地长大了，但并不明显，大概只有 2 倍左右（平均晶粒尺寸约 25 μm），比传统电弧焊方法小得多。图 4.3-39 为 MAG、等离子弧焊和激光焊热影响区粗晶区金相照片。图 4.3-40 为三种焊接方法焊接后原奥氏体的平均晶粒尺寸大小的比较图。可以看到，MAG 焊和等离子弧焊的粗晶区奥氏体晶粒长大到 200 μm 左右，为激光焊的 8 倍。

为了观察焊接线能量对 SS400 超细晶粒钢焊缝和粗晶区原奥氏体晶粒尺寸长大的影响，特意显著加大了激光焊接线能量，研究晶粒尺寸变化情况，结果如图 4.3-41 所示。可以看到晶粒尺寸随着线能量的增加而迅速增大，当激光焊接线能量达到 480 J/mm 时，晶粒尺寸显著长大，焊缝晶粒接近 70 μm，粗晶区超过 80 μm。但在正常激光焊接热输入范围内（< 200 J/mm），其粗晶区平均晶粒尺寸最大不超过 45 μm。



(a) 焊缝和粗晶区　(b) 细晶区　(c) 不完全相变区　(d) 母材

图 4.3-38 SS400 钢激光焊接接头不同区域晶粒尺寸照片

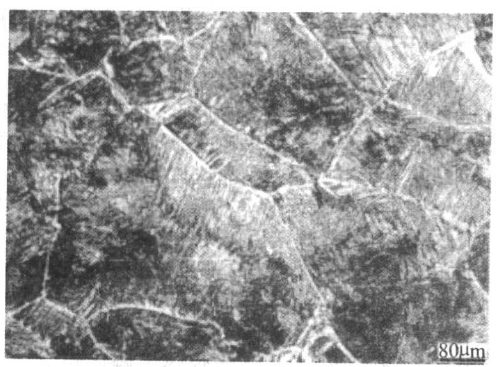
3.3.3 激光焊接接头组织转变规律的研究

(1) 实验材料和方法

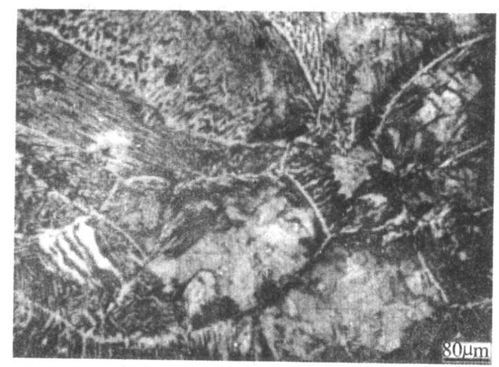
实验采用的超细晶粒碳素钢为屈服强度 400 MPa 级的 SS400 钢，$\sigma_s = 360$ MPa，$\sigma_b = 460$ MPa，其化学成分已在表 4.3-3 中表示。3 kW CO_2 激光用来进行焊接，激光模式为 $TEM_{00} + TEM_{01}$，127 mm 焦长的 ZnSe 透镜用来聚集激光束，Ar 气用来保护熔池，焊接时不填丝。

Gleeble－1500 热模拟机用来模拟焊接热影响区粗晶区的热循环，试样用来进行冲击韧性试验。焊缝和热影响区的冲击试验采用艾氏冲击，试样大小为 10 mm × 2.5 mm × 70 mm，冲击试验温度为 －40℃。用于焊缝金属和母材拉伸试验的试样尺寸为 1.5 mm × 2.1 mm × 50 mm。

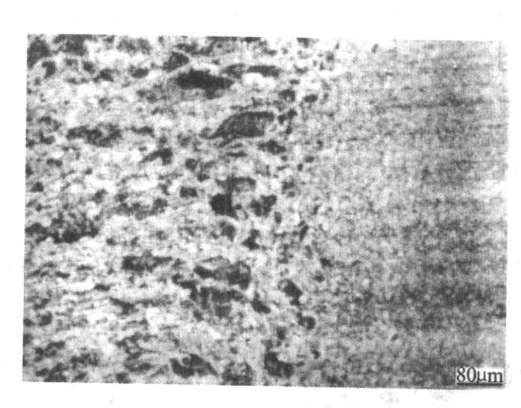




(a) MAG焊 (200A, 26V, 0.4m/min)



(b) 等离子弧焊 (115A, 28V, 0.25m/min)



(c) 激光焊 (3500W, 1.6m/min)

图 4.3-39 SS400 钢 MAG 焊、等离子弧焊和激光焊热影响区粗晶区

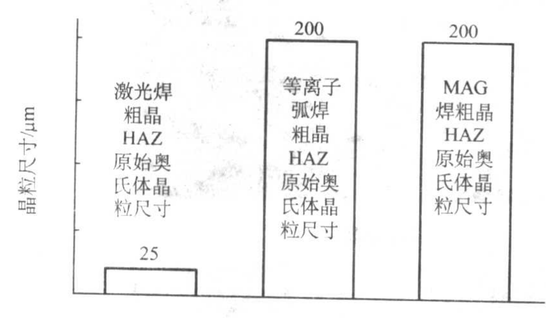


图 4.3-40 三种焊接方法焊接后原始奥氏体的平均晶粒尺寸大小比较图

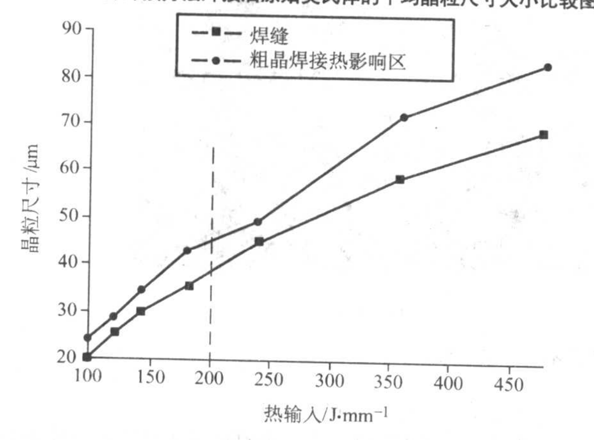


图 4.3-41 焊缝和粗晶区晶粒尺寸与焊接线能量的关系

（3 mm SS400 钢板正常激光焊接的线能量 < 200 J/mm）

（2）焊接线能量对接头组织转变的影响

从上述对激光焊热循环的分析已经看到，激光焊接时 800～500℃的冷却速度极大，达到 SS400 超细晶粒钢轧制时 800℃形变后冷却速度（20℃/s）的 40 倍左右，也大大高于普通电弧焊的冷却速度。因此，激光焊接接头组织必定是与母材及传统电弧焊接接头显著不同的极度不平衡组织。又由于 SS400 母材的含碳量和碳当量都较低，这种不平衡组织应该具有较好的韧性。

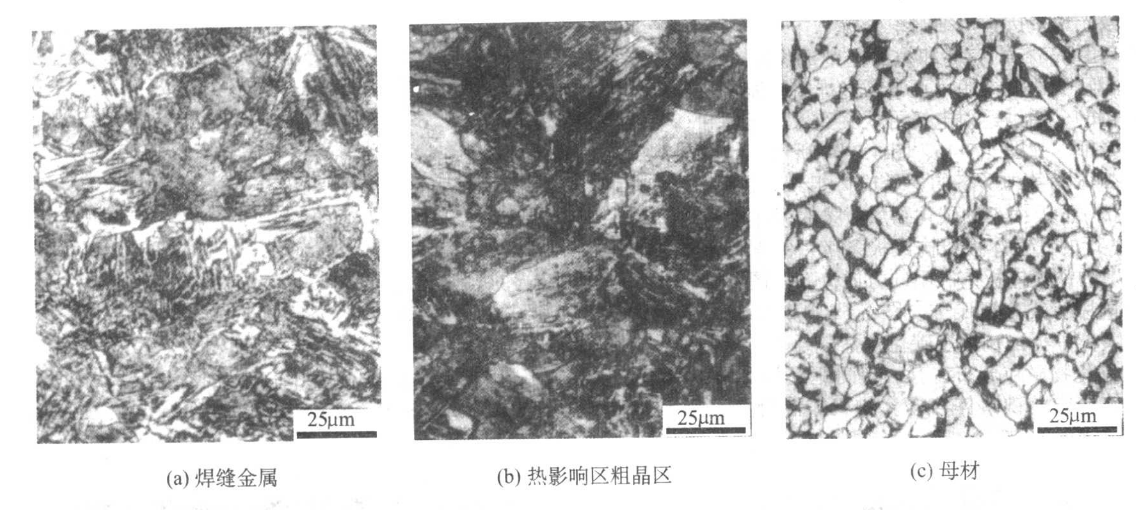
实验表明，SS400 钢正常规范激光焊的焊缝和热影响区粗晶区的微观组织，均以下贝氏体以主，或加上一定数量的马氏体和少量铁素体。从图 4.3-42 可看到以激光功率 2 100 W，焊速 0.8 m/min（线能量 157.5 J/mm）规范焊接时的接头组织：焊缝为下贝氏体、少量马氏体和少量侧板条铁素体，粗晶区则为下贝氏体和一定量马氏体。与等离子弧焊和 MAG 焊的热影响区粗晶区组织（由上贝氏体、先共析铁素体和侧板条铁素体组成，如图 4.3-42a 和图 4.3-42b 所示）比较，激光焊较快的冷却速度有利于生成韧性较高的组织。

图 4.3-43 为采用 2 400 W 激光功率，不同速度焊接时焊缝金属的组织。焊速为 0.8 m/min 时，组织以下贝氏体为主，同时含有少量侧板条铁素体和少量马氏体。焊速降低（0.6 m/min）时，出现更多的侧板条铁素体及少量珠光体。焊速提高（v = 1.0 m/min）时，马氏体量增多，侧板条铁素体消失。

图 4.3-44 为激光功率 2 400 W，不同焊速时热影响区粗晶区的组织。焊速为 0.8 m/min 时，组织为下贝氏体和少量马氏体。焊速降低（v = 0.6 m/min）时出现侧板条铁素体和少量珠光体。焊速提高（v = 1.0 m/min）时，马氏体量增多。

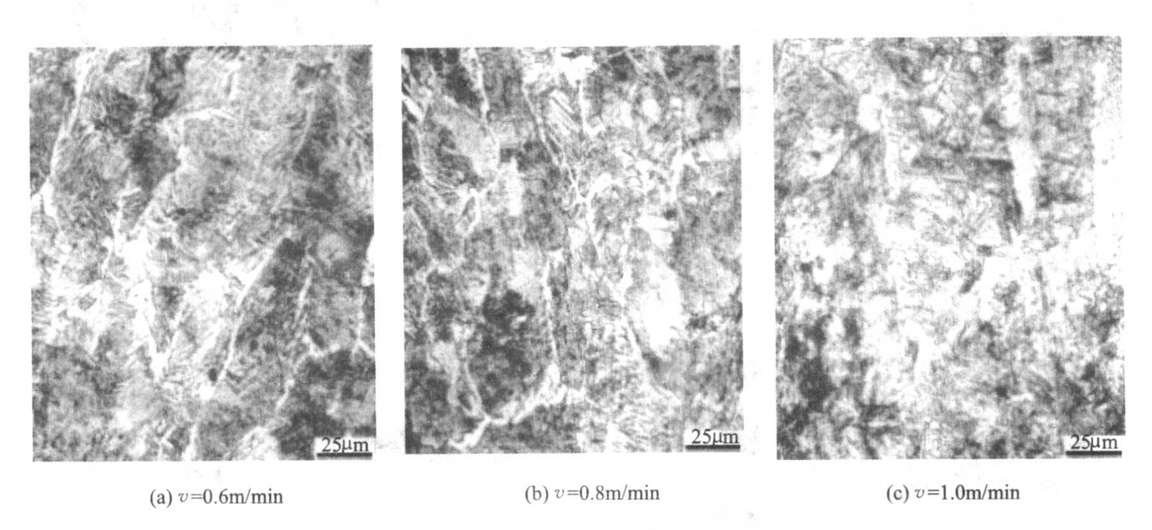
比较图 4.3-42a 和图 4.3-43b 可以看到，采用0.8 m/min 速度焊接时，如果激光功率从 2 100 W 增大到2 400 W，在焊缝金属中马氏体量减少但侧板条铁素体增多。比较图 4.3-42b 和图 4.3-44b 可以看到，采用0.8 m/min速度焊接时，如果激光功率从 2 100 W 增大到2 400 W，在热影响区粗晶区金属中马氏体量减少。





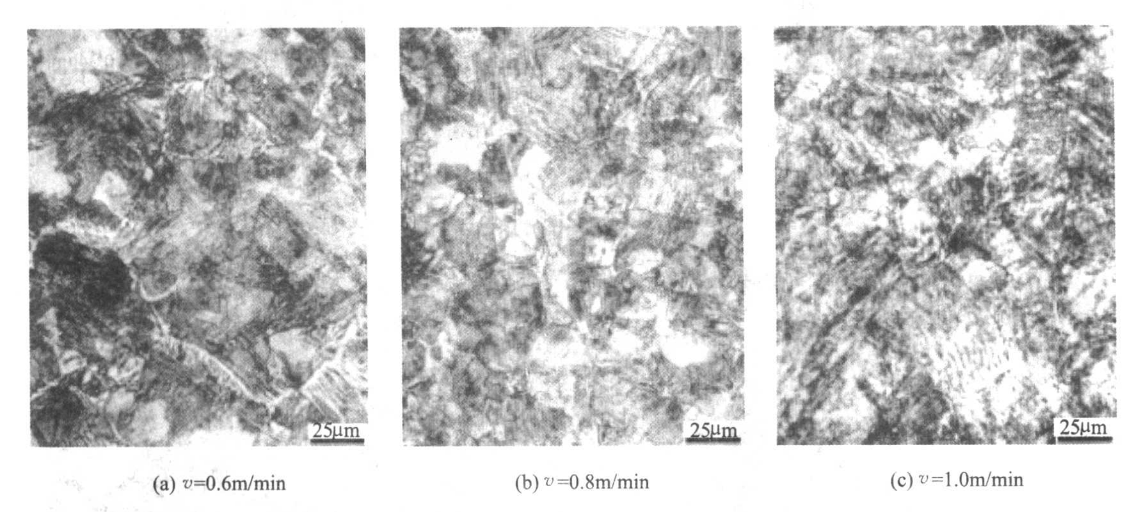
(a) 焊缝金属 (b) 热影响区粗晶区 (c) 母材

图 4.3-42 SS400 激光焊接接头的微观组织（$P=2\,100$ W，$v=0.8$ m/min）



(a) v=0.6m/min (b) v=0.8m/min (c) v=1.0m/min

图 4.3-43 不同速度焊接时焊缝金属的组织（$P=2\,400$ W）



(a) v=0.6m/min (b) v=0.8m/min (c) v=1.0m/min

图 4.3-44 不同线能量焊接时热影响区粗晶区的组织（$P=2\,400$ W）

图 4.3-45 系统统计了焊缝各组织的组成与线能量的关系。可以看到随着线能量的减小，组织转变时的冷却速度不断加快，焊缝组织相继按铁素体（F）、珠光体（P）、下贝氏体（B_L）、马氏体（M）次序发生变化。在正常的激光焊接规范内（线能量 < 200 J/mm），焊缝组织中铁素体很少，主要为下贝氏体加一定数量马氏体（它们之间的比例也随线能量变化）。只有特意加大线能量时，才在焊缝中看到较多的铁素体（晶界铁素体和侧板条铁素体）和珠光体，后面实验将证明，在这种情况下，焊缝的强度和韧性将不可避免地下降。



(3) 激光焊接接头精细组织分析

SS400 超细晶粒钢焊缝和粗晶区中的组织，是在母材含碳量低，相转变速度很快（正常激光焊接线能量条件下）的情况下获得的，通过透射电镜可观察到下贝氏体和马氏体精细组织的特征，如图 4.3-46、图 4.3-47 所示。

图 4.3-46 为各种形态的下贝氏体组织，其中图 a～d 中均是约 0.05 μm 极细小的碳化物从板条铁素体中析出。图 a、b 中互相平行的铁素体板条构成板条束，铁素体板条也很细小；图 c 中的铁素体板条以不同方向分布；图 d 中贝氏体板条间有少量片状残余奥氏体。图 e、f 中则是碳化物微粒从块状的铁素体中析出，细小碳化物弥散分布，互不平行。图 g、h 则是碳化物微粒分布在有一定间距互相平行的平面上，类似珠光体形式的铁素体与碳化物机械混合物，只不过碳化物不是片状

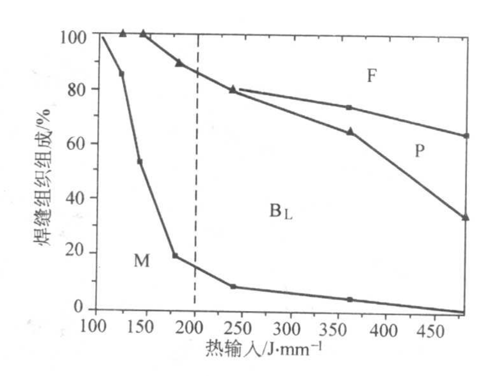
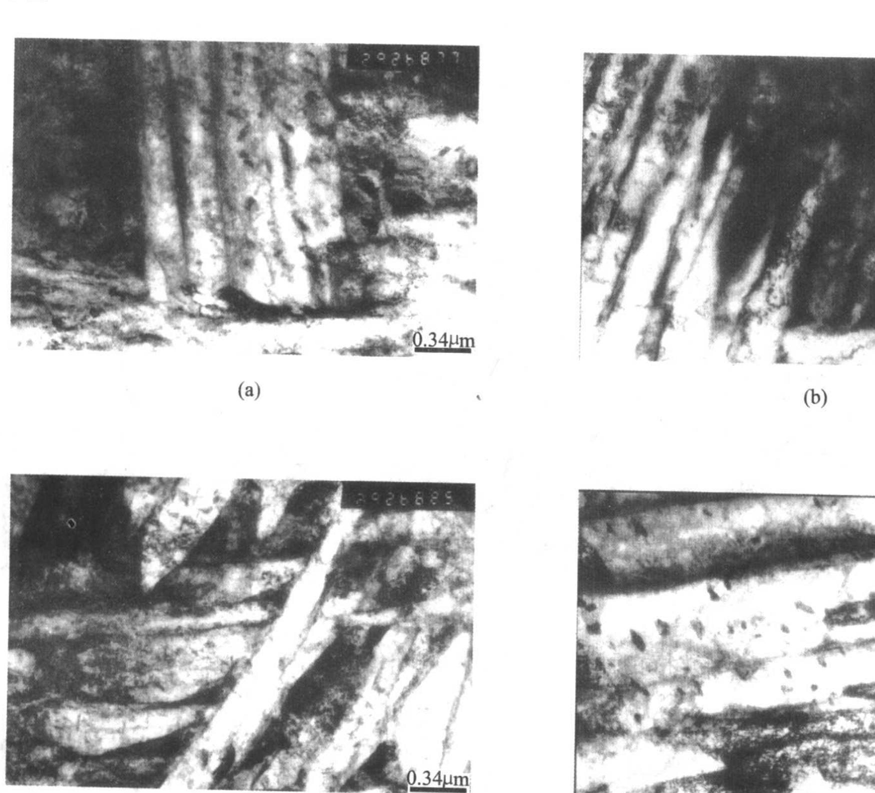
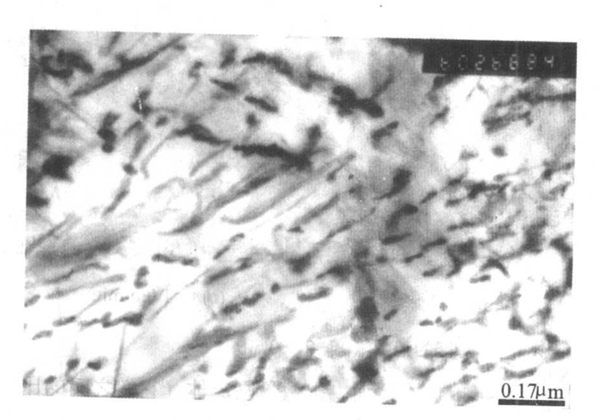


图 4.3-45 焊缝组织组成与焊接线能量的关系

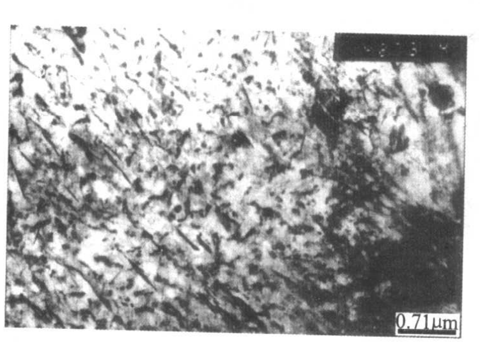
（3 mm SS400 钢板正常激光焊接的线能量＜200 J/mm）



(a) (b) (c) (d)



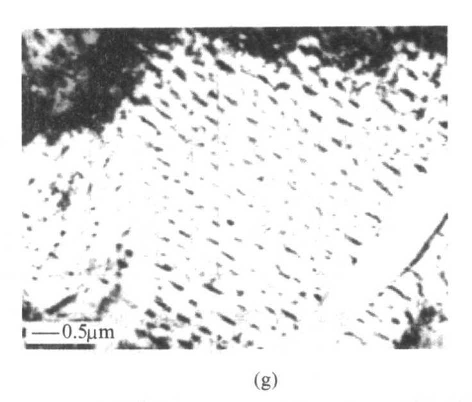
(e)



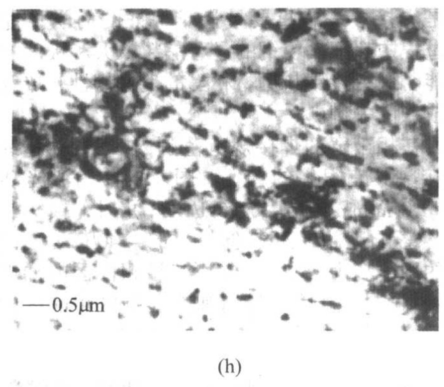
(f)

图 4.3-46 焊缝中的下贝氏体透射电镜照片





(g)



(h)

续图 4.3-46

（焊接规范：a、c、d、e—2 400 W，1.0 m/min；b、f、g、h—2 400 W，0.8 m/min）

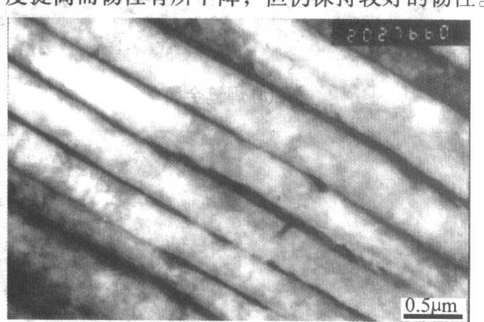
的，而是在片上弥散分布（可以认为它是由于“相界面沉淀”而形成的——在共析转变时，冷却速度较快，碳原子在奥氏体中扩散不充分，奥氏体中平均含碳量达不到共析成分，渗碳体将以颗粒形式在 γ/α 界面上沉淀），暂将它们统列入下贝氏体之列。

上述组织中，碳化物均以极细小的微粒析出，许多情况下，基体又是十分细小的板条铁素体，可以预料它们在具有很高强度的同时，也有很高的韧性。

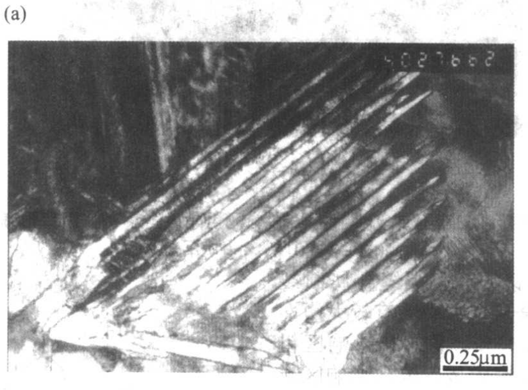
图 4.3-47 显示焊缝中马氏体的特征。由于母材含碳量低，焊缝中的马氏体均为板条马氏体，板条宽度很细小，约为 0.3～0.5 μm，其中图 b 的马氏体板条中有少量碳化物析出，表明已有部分自回火，图 c 为贝氏体与板条马氏体的混合组织。根据分析也可预知，这些组织较完全的下贝氏体强度提高而韧性有所下降，但仍保持较好的韧性。



(a)



(b)



(c)

图 4.3-47　焊缝中的马氏体透射电镜照片

（焊接规范：a、c—2 400 W，1.0 m/min；b—2 400 W，1.2 m/min）

3.3.4　超细晶粒钢激光焊接接头力学性能及其焊接性分析

（1）焊接接头硬度分布及软化区研究

图 4.3-48 所示为激光焊接接头硬度分布曲线及线能量的影响。由图可见，激光焊接接头不存在软化区，只有焊缝和热影响区的硬化。线能量越小，硬度越高，最高达到 330 HV 左右。从下面接头冲击性能实验结果可知，这种局部硬化程度并不损害接头韧性。

（2）焊接接头强度和韧性

由于激光焊接接头没有软化区而只有硬化，可以预见接头强度必高于母材。采用标准试样进行了接头横向拉伸试验，所有试样都断在母材，确实表明焊接接头强度不存在任何问题。

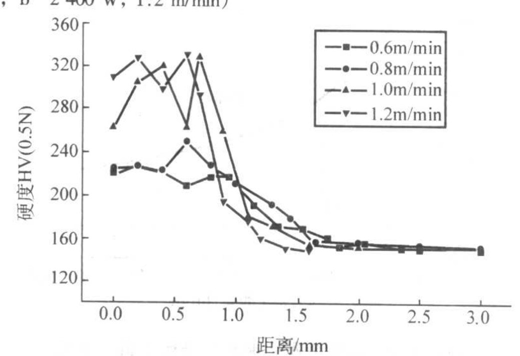


图 4.3-48　激光焊接接头硬度分布（$P = 2\ 400$ W）

冲击韧性是焊接接头最重要且最难保证的力学性能指标。尤其焊接过程中超细晶粒钢的显著晶粒长大和极度的组织不平衡性，能否保持接头与母材相当的良好韧性，成为超细晶粒钢焊接成败的关键。

实验证明，在相当宽的焊接规范范围内，SS400超细晶粒钢激光焊接接头具有很好的韧性。图4.3-49为激光功率2 100 W，焊速0.8 m/min（$Q=157.5$ J/mm）时，接头三个区域（焊缝、热影响区粗晶区、母材）的－40℃艾氏冲击功。焊缝金属的冲击功为25.3 J，热影响区粗晶区的冲击功为20 J，母材的冲击功为15 J，焊缝和热影响区粗晶区的韧性均高于母材。

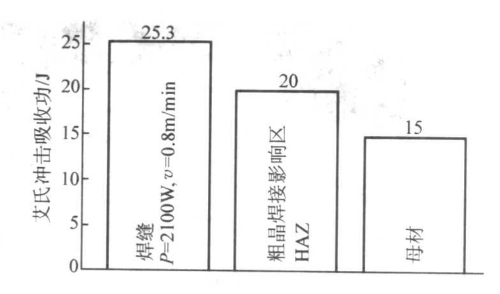
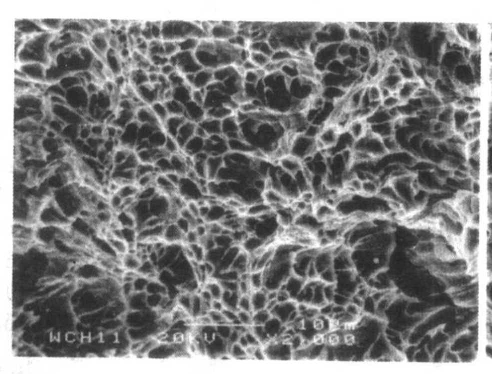
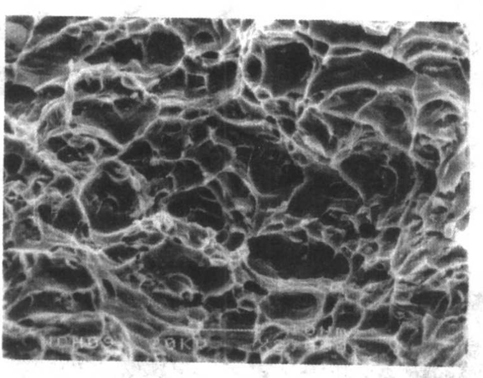


图4.3-49　焊接接头的－40℃艾氏冲击功
（$P=2\ 100$ W，$v=0.8$ m/min）



(a) 焊缝金属



(b) 热影响区粗晶区

(c) 母材

图4.3-50　焊接接头三个区域（焊缝、热影响区粗晶区、母材）断口形貌的扫描电镜照片
（$P=2\ 100$ W，$v=0.8$ m/min）

图4.3-50为断口形貌的扫描电镜照片。焊缝金属断裂表面由细而深的韧窝组成，这表明金属在断裂前有较大塑性变形，金属有很好的韧性。图4.3-50b和c显示热影响区粗晶区和母材的断口形貌，断口都由韧窝组成，但热影响区断口的韧窝比焊缝略浅，而母材的韧窝又比热影响区浅，这与它们的冲击功值是一致的。

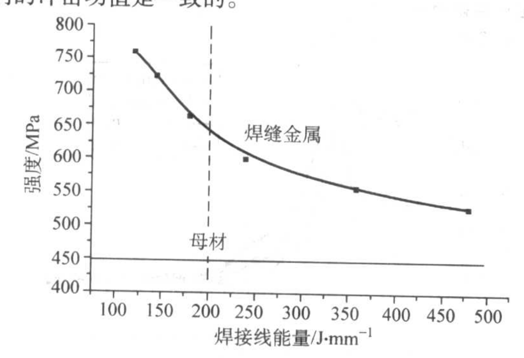


图4.3-51　焊缝金属强度与焊接线能量的关系
（3 mm SS400钢板正常激光焊接的线能量小于200 J/mm）

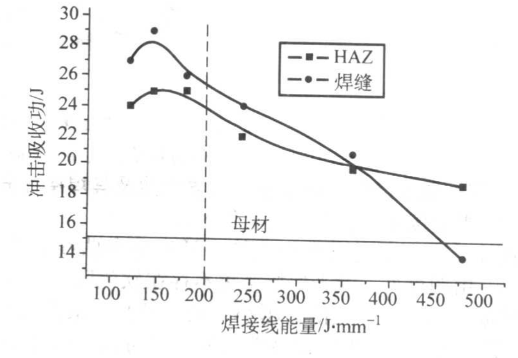
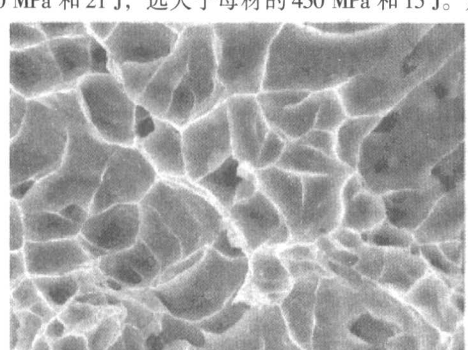
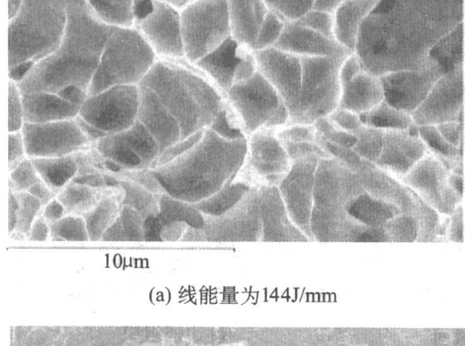


图4.3-52　焊缝、HAZ的冲击功（－40℃）与焊接线能量的关系
（3 mm SS400钢板正常激光焊接的线能量 < 200 J/mm）

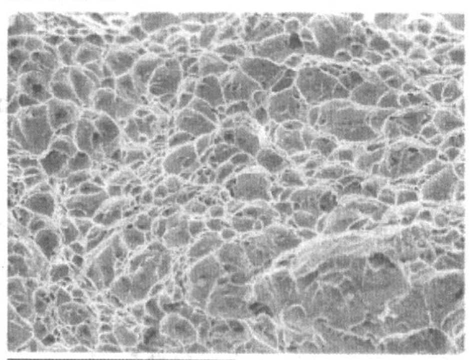
图4.3-51所示为焊缝金属强度与焊接线能量的关系。图4.3-52所示为焊缝、HAZ的低温冲击功（－40℃）与焊接线能量的关系。可见，在正常的激光焊接规范范围内（线能

量小于 200 J/mm)，焊缝金属的强度、焊缝与热影响区的低温冲击韧性都大大高于母材。焊缝强度随线能量的减小单调增加；而焊缝与热影响区的冲击功都在线能量为 144 J/mm 附近有最高值，线能量减小或加大都使韧性值降低。在采用明显过大的线能量焊接情况下，焊缝金属强度和冲击值都会随线能量的增加而减小，但在相当大的范围内仍高于母材(尽管此时焊缝和粗晶区晶粒已显著长大)。例如当线能量增至360 J/mm时，焊缝和粗晶区原奥氏体平均晶粒尺寸已分别长大至 58 μm 和 72 μm，但焊缝金属的抗拉强度和低温冲击功仍达到 560 MPa 和 21 J，远大于母材的 450 MPa 和 15 J。只是为了进行对比将线能量增大至 480 J/mm 时，冲击功才降为 14 J，不过此时焊缝成形很差，已不属于正常激光焊接范围，而是进入普通电弧焊的热输入范围了。

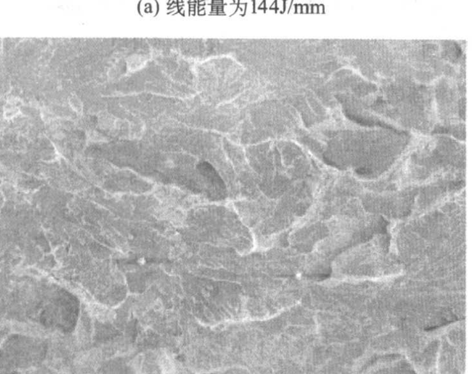
图 4.3-53 为 SS400 超细晶粒钢在热输入分别是144 J/mm，360 J/mm，480 J/mm 施焊焊缝及母材的低温冲击断口照片。可以看出，热输入为 144 J/mm 时，冲击断口全部由韧窝组成且韧窝深；热输入为 360 J/mm 时，冲击断口主要由韧窝组成但韧窝较浅；母材的冲击断口也由韧窝组成，多数韧窝也比较平浅。只有热输入为 480 J/mm 时，冲击断口才变为解理花纹。

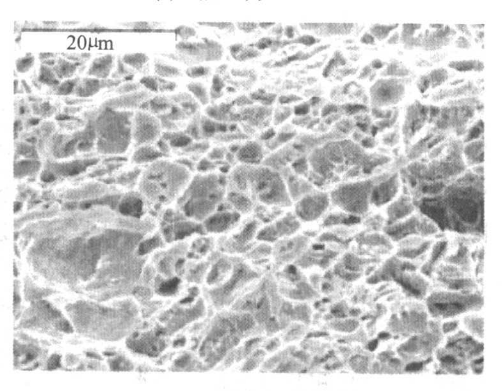
(a) 线能量为144J/mm



(b) 线能量为360J/mm



(c) 线能量为480J/mm



(d) 母材

图 4.3-53　不同热输入时 SS400 钢焊缝及母材冲击断口照片

韧性值随线能量的变化与图 4.3-45 中组织组成的变化规律有很好的对应性：线能量为 144 J/mm 时，焊缝金属由下贝氏体和板条马氏体组成，几乎没有铁素体，韧性最好。加大线能量会出现越来越多的侧板条铁素体，减小线能量则使马氏体量增多，两者都会降低韧性。但在相当大的线能量范围内，焊缝和粗晶区组织仍然是以高韧性的下贝氏体为主，所以焊接接头可以既保持高强度，又有良好的韧性。

3.4　400 MPa 级超细晶粒碳素钢筋的焊接

建筑用钢是我国钢材品种中消耗量最大的品种，其中又以混凝土结构热轧带肋钢筋为主。自 20 世纪 70 年代我国采用 16Mn Ⅱ级钢筋取代 Q235 Ⅰ级钢筋后，又研制出 20MnSi Ⅱ级钢筋取代了 16Mn 钢筋，并一直沿用至今。随着微合金化 20MnSiV、20MnSiNb、20MnTi 等 400 MPa Ⅲ级钢筋的研制成功，90 年代将 400 MPa Ⅲ级钢筋列入我国国标。

采用细化晶粒的方法提高强度是不增加成本的最有效手段之一。通过大量的试验研究，采用焊接性优良、价值低廉的工业生产普通碳素钢（Q235）连铸坯，经过控制轧制和穿水冷却，获得平均晶粒尺寸小于 10 μm 的超细晶粒热轧带肋钢筋，从而实现了把传统工艺生产的Ⅰ级钢筋提高到Ⅲ级钢筋强度水平的目标。在钢筋混凝土用热轧带肋钢筋的应用中，焊接是主要的连接方式，随着钢筋强度级别的提高，焊接性变差，所适用的焊接方法和工艺受到限制，如电渣压力焊只适用于Ⅰ级、Ⅱ级钢筋。经过焊接热作用，热影响区(HAZ) 晶粒粗化后能否保持高的强度，是超细晶粒钢筋应用所面临的技术关键。

3.4.1　超细晶粒热轧带肋钢筋的特点

（1）超细晶粒钢筋的化学成分和力学性能

试验钢筋采用工业生产的普通碳素钢（Q235）连铸坯，经过控制轧制和穿水冷却获得具有超细组织的热轧带肋钢筋，直径 25 mm。化学成分见表 4.3-30，处于 Q235 钢的化学成分范围内。力学性能如表 4.3-31，屈服强度满足不小于 400 MPa 的要求，抗拉强度达到 GB1499—1998 中 HRB400 Ⅲ级钢筋的强度水平。相对于 Q235 钢，强度提高了一倍。

表 4.3-30　试验用超细晶粒钢筋的化学成分（质量分数）

%

C	Si	Mn	P	S
0.20	0.30	0.55	<0.03	<0.03



表 4.3-31　试验用超细晶粒钢筋的力学性能

σ_s/MPa	σ_b/MPa	δ_5/%
450	575	25

(2) 超细晶粒钢筋的组织与硬度分布特征

超细晶粒钢筋的组织形貌与传统工艺生产的钢筋不同，钢筋横、纵截面经硝酸酒精腐蚀后宏观形貌如图 4.3-54，可见，钢筋截面明显划分为两个区域。中部组织为铁素体＋珠光体，平均晶粒尺寸为 7.8 μm（图 4.3-55a、b）。边部组织为贝氏体（图 4.3-55c）。而传统工艺生产的 Q235 钢筋截面上没有这种区域的划分，中部和边部均为铁素体＋珠光体（图 4.3-56），近表面的组织略细些，中部平均晶粒尺寸为20 μm，近表面平均晶粒尺寸为 16 μm。

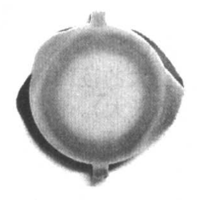
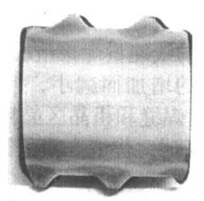
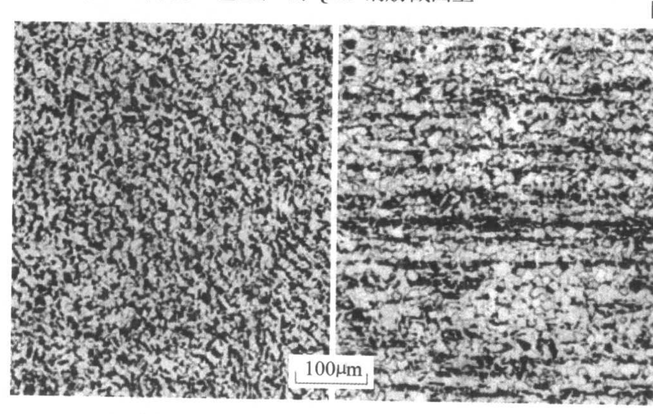
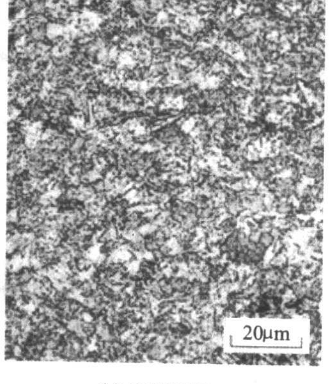



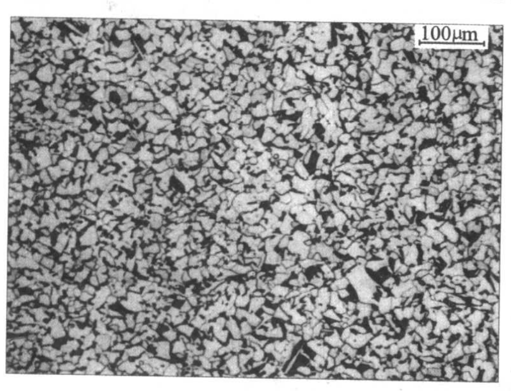
图 4.3-54　超细晶粒钢筋的截面宏观形貌



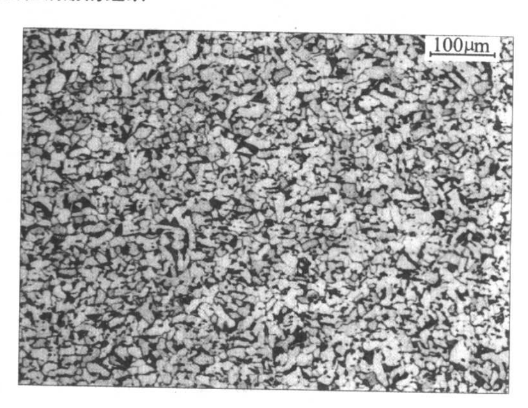


(a) 中部横截面　(b) 中部纵截面　(c) 边部组织

图 4.3-55　超细晶粒钢筋的组织



(a) 中部组织



(b) 边部组织

图 4.3-56　传统工艺生产 Q235 钢筋的组织形貌

从钢筋母材截面中心向边缘以及横肋测试维氏硬度分布（见图 4.3-57），可以看到硬度的分布规律：第一轮试制钢筋中部的平均硬度为 140 HV，进入边部区域，随着接近表面，硬度不断提高，由 156 HV 增加到 188 HV，横肋的硬度最高达 238 HV。第二轮试制钢筋在钢筋轴心附近硬度最低（135 HV），随着向边部接近，硬度略有增加，中部的平均硬度为 150 HV；进入边部区域，随着接近表面，硬度迅速增加，由 163 HV 增加到 199 HV；横肋的硬度最高达 247 HV。

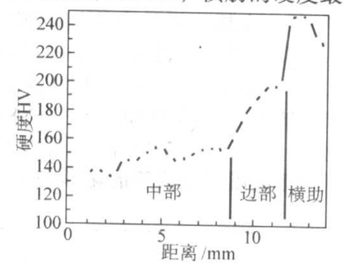


图 4.3-57　超细晶粒钢筋的硬度分布

3.4.2　钢筋焊接标准及要求

在建筑工程中，有关钢筋的焊接及检验是按国家建设部行业标准 JGJ18—96《钢筋焊接及验收规程》执行，该标准中规定适用于热轧Ⅲ级钢筋对接的焊接方法有闪光对焊、电弧焊和气压焊三种。电渣压力焊只适用于热轧Ⅰ、Ⅱ级钢筋。其中焊接接头的检验，除规定了外观质量和尺寸偏差外，所有接头形式都要求检验抗拉强度，只有闪光对焊还要求检验接头弯曲。除此之外，没有其他检验项目和指标要求。

对焊接接头拉伸试验结果有以下要求：三个接头试件的抗拉强度均不得小于该级别钢筋规定的抗拉强度（Ⅲ级钢筋 $\sigma_b \geqslant 570$ MPa）；三个接头试件均应断于焊缝之外，并应至少有两个试件呈延性断裂。

对闪光对焊焊接接头弯曲试验结果有以下要求：焊缝应处于弯曲中心点，Ⅲ级钢筋接头弯心直径为 $5d$，弯曲角为 90°，当弯至 90°时，至少有两个试件不得发生破断。

建设部行业推荐标准 JGJ/T 27—2001《钢筋焊接接头试验方法标准》规定了试样的尺寸和试验方法。该标准中还包



括了冲击试验方法和疲劳试验方法，但只记录试验结果，没有评定指标。

3.4.3　超细晶粒碳素钢Ⅲ级钢筋焊接试验

试验用钢筋为 ϕ25 mm 热轧带肋钢筋，其性能达到了Ⅲ级钢筋的指标要求。根据目前在大型建设工程及高层建筑上钢筋连接方法的应用情况，普遍采用电渣压力焊连接竖向或倾斜度在4:1范围内受力的钢筋，采用闪光对焊或机械方法连接水平钢筋，其他焊接方法使用的比较少。由于原25MnSi Ⅲ级钢筋碳当量在0.5%以上，焊接性较差，JGJ18—96《钢筋焊接及验收规程》规定Ⅲ级钢筋不采用电渣压力焊，但在实践中，对于优质的Ⅲ级钢筋，经过充分的试验和考核，已经把电渣压力焊应用于工程施工中。超细晶粒钢筋的碳当量约为0.3%，属可焊性好的钢种，因此在试验中，尝试了应用电渣压力焊的可行性，并采用闪光对焊和电弧焊方法进行了全面试验研究，以便对超细晶粒碳素钢热轧带肋钢筋的焊接性作出客观的评价。

（1）超细晶粒碳素钢Ⅲ级钢筋电渣压力焊

电渣压力焊是我国独创的钢筋焊接方法，只适用于竖向或者倾斜度在4:1范围内的Ⅰ级、Ⅱ级钢筋的焊接。它具有工艺简单，操作方便，施焊速度快，成本低廉，不受施工现场条件的限制，适于高空操作等特点，被广泛应用于大型工程的施工。由于HRB400 Ⅲ级钢筋碳当量较高，容易产生焊接接头脆断，因此在JGJ18—96《钢筋焊接及验收规程》中未列入电渣压力焊。超细晶粒Ⅲ级钢筋属易焊接钢筋，可以尝试使用电渣压力焊的可行性。

1）焊接工艺方法　钢筋电渣压力焊是将两钢筋安放成竖向对接形式，利用焊接电流通过两钢筋端面间隙，在焊剂层下形成电弧过程和电渣过程，产生电弧热和电阻热，熔化钢筋，加压完成的一种焊接方法。它具有电弧焊、电渣焊和压力焊的综合特点。

电渣压力焊时，电弧埋在焊剂中，全凭经验控制焊接过程。本试验在建筑工地，由现场技术工人按实际施工工艺操作。焊接设备为MH－36埋弧对焊机，焊剂采用普通HJ431焊剂。记录焊接工艺参数列于表4.3-32。

表4.3-32　超细晶粒Ⅲ级钢筋电渣压力焊主要参数

焊接电流/A	焊接电压/V		焊接通电时间/s	
	电弧过程	电渣过程	电弧过程	电渣过程
450	40～45	22～27	25	6

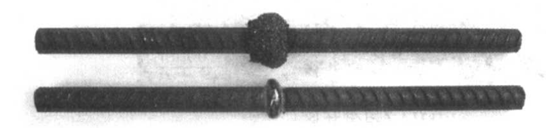


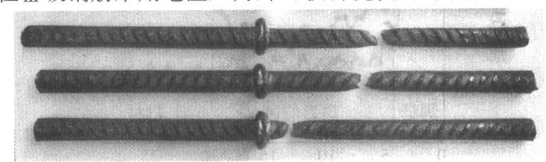
图4.3-58　电渣压力焊试样外观

电渣压力焊在顶压过程中，上钢筋端部压入金属熔池，使液态金属和熔渣从接头处挤压出去，熔渣形成渣壳，液态金属形成焊包，如图4.3-58所示。焊接完成时，熔渣包裹住焊包，去除熔渣后露出光滑的焊包。

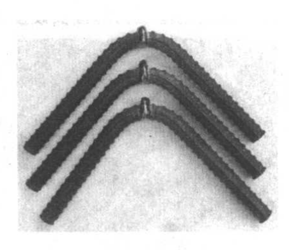
2）焊接头拉伸和弯曲试验　表4.3-33是电渣压力焊接头拉伸和弯曲试验的结果，$\sigma_b \geq 570$ MPa，达到Ⅲ级钢筋规定的抗拉强度指标。记录的 $\sigma_s > 400$ MPa。由图4.3-59可见三个拉伸试样中有一件断裂位置离焊缝较近，但断在焊缝之外，处在母材位置。表4.3-33中的测量数据和图4.3-60所示的拉伸应力－应变曲线记录都表明：三个试样的强度相当，都有明显的均匀延伸和缩颈。从拉伸断口形貌（图4.3-61）上看，无论断在什么位置，断口都呈杯锥状，具有明显的剪切唇区。虽然对电渣压力焊没有弯曲性能要求，还是采用4d的弯心直径进行了冷弯试验，结果合格。因此，超细晶粒Ⅲ级钢筋采用电渣压力焊可获得优质的焊接接头。

表4.3-33　钢筋电渣压力焊接头拉伸和弯曲试验结果

σ_b /MPa	σ_s /MPa	断裂位置距焊缝 /mm	拉伸后试件伸长 /mm	相对颈缩 /%	弯曲 $D=4d$，90°
570	415	135	80	60.4	完好
580	450	120	77	63.5	完好
580	435	29	82	55.2	完好



(a) 拉伸试件



(b) 弯曲试件

图4.3-59　钢筋电渣压力焊接头拉伸和弯曲试件

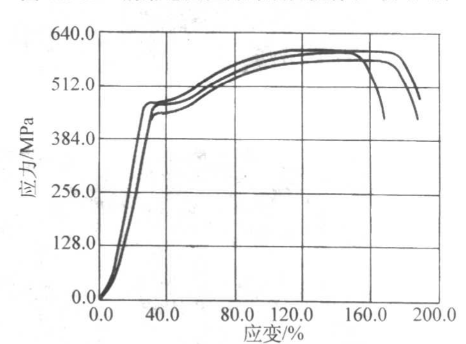


图4.3-60　电渣焊接头拉伸应力－应变曲线



(a) 距焊缝29mm



(b) 距焊缝120mm

图4.3-61　电渣焊接头拉伸断口形貌

3）焊接接头硬度分布　图4.3-62为钢筋电渣压力焊接

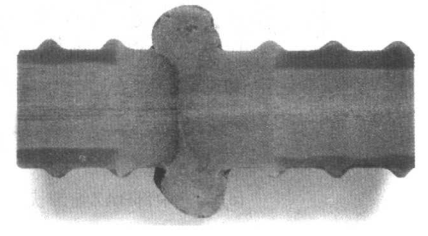


图4.3-62　电渣压力焊接头纵剖面宏观形貌

头纵剖面宏观形貌。在钢筋轴线处焊缝很窄，钢筋边部焊缝有一定宽度。上钢筋热影响区最大宽度为 19 mm，下钢筋热影响区最大宽度为 12 mm。可见焊接热输入很大，在热影响区中，不存在原母材中部与边部的界面。沿电渣压力焊接头纵剖面距母材表面 2 mm 处和钢筋轴线处测试硬度分布（图 4.3-63）表明：焊缝的硬度较高，在热影响区中，靠近熔合线的硬度最高，随着距熔合线距离的增加，硬度逐渐降低。在母材表面处，焊缝及热影响区的硬度比母材边部的硬度有所降低，但不低于母材中部的硬度；在轴线处，焊缝及热影响区的硬度变化幅度很小，且皆高于母材中部的硬度。因此从总体上看，超细晶粒碳素钢Ⅲ级钢筋电渣压力焊接头不存在软化问题，淬硬倾向也很小。

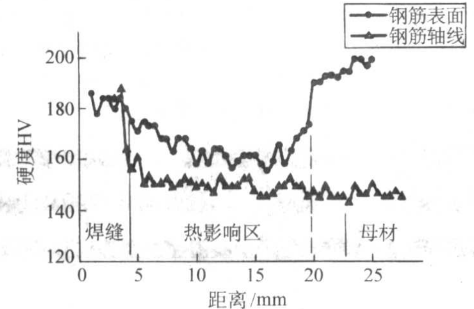


图 4.3-63 钢筋电渣压力焊接头硬度分布

4）焊接接头金相组织 由于电渣焊时电渣过程时间较长，焊接完成后，熔化的焊剂形成渣壳紧密裹住焊包起到缓冷作用，所以对钢筋的焊接热输入很大，冷却速度缓慢。

焊缝的组织为柱状晶，柱晶宽度非常宽，图 4.3-64a 所示为最窄的柱状晶视场，晶界为先共析铁素体和少量珠光体，晶内是针状铁素体。

由图 4.3-64b、c 可以看到，在熔合线附近及粗晶区，先共析铁素体将奥氏体晶界刻画得非常清晰，奥氏体晶粒非常粗大，晶内主要是珠光体，还有少量粗大针状铁素体。随着距熔合线距离的增加，奥氏体晶粒变小，块状铁素体增多，珠光体减少（图 4.3-64c），硬度也逐渐降低。再向

100μm

(a) 焊缝

100μm

(b) 熔合线外

100μm

(c) HAZ粗晶区

100μm

(d) HAZ粗带状区

100μm

(e) 钢筋中部HAZ细带状区

100μm

(f) 钢筋边部HAZ细带状区

图 4.3-64 钢筋电渣压力焊接头组织形貌



外出现具有明显轧制特征的条带状分布的铁素体 + 珠光体组织（图 4.3-64d）。条带的宽度及晶粒尺寸随着距熔合线距离的增加而变细（图 4.3-64d、e）。同时还可看到，热影响区细带状区的晶粒尺寸与原始母材中部组织相当，但其中珠光体的比例比母材中部有所增加，因而使得带状形貌更加明显，这也是该区的硬度不低于母材的原因。而在钢筋边部则由贝氏体转变为比母材中部更细小的铁素体 + 珠光体条带组织（图 4.3-64f）。热影响区中，钢筋中部与边部的组织分布几乎没有差别，但边部的条带状组织更细小。

5）焊接接头冲击试验　为了获得焊接接头的全面性能，按照 JGJ/T 27—2001《钢筋焊接接头试验方法标准》中对冲击试验规定的取样方法，在钢筋焊接接头轴线处取冲击试样。根据电渣压力焊接头的组织分布情况，使冲击缺口分别位于焊缝、熔合线外侧粗晶区、粗带状区和细带状区四个典型部位，并同时对母材取样进行试验。

试验结果见表 4.3-34 和图 4.3-65。

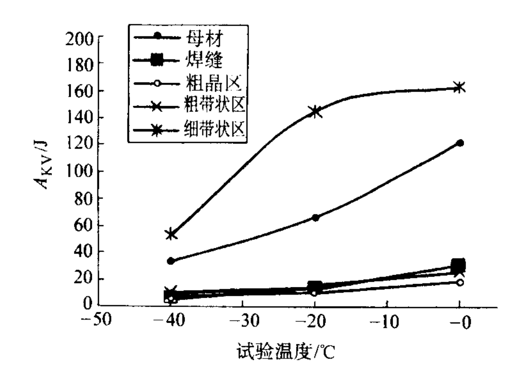
由冲击试验结果可以看到：钢筋母材的冲击功在 0℃时较高，达 100 J 以上，随着试验温度的降低而逐渐减小，-20℃时冲击功下降一半，纤维断面率也降至 50%以下，因此钢筋母材的脆性转变温度为 -20℃。

焊缝、熔合线外侧粗晶区、粗带状区的冲击功几乎处于同样的低水平，三个试验温度的冲击功都在下平台范围，断口也表现出明显的脆性特征。

细带状区的冲击功在三个试验温度下均明显高于钢筋母材，在 -20℃时仍有平均值 145 J 的冲击功。脆性转变温度低于 -20℃。

表 4.3-34　电渣压力焊接头冲击试验结果

缺口位置	0℃		-20℃		-40℃	
	A_{KV}/J	纤维断面率/%	A_{KV}/J	纤维断面率/%	A_{KV}/J	纤维断面率/%
母材	127	82	72	50	30	27
	132	90	62	48	40	29
	108	81	65	47	30	32
	122	84	66	48	33	29
焊缝	33	21	15	12	7	3
	39	29	16	21	8	7
	21	25	10	18	7	3
	31	25	14	17	7	4
熔合线外粗晶区	19	22	12	10	8	4
	27	25	13	17	6	3
	12	16	8	5	9	4
	19	21	11	11	8	4
粗带状区	21	24	16	9	8	4
	20	23	16	15	9	2
	39	27	14	14	13	4
	27	25	15	13	10	3
细带状区	160	100	154	71	52	21
	166	100	126	55	34	15
	166	100	154	70	73	28
	164	100	145	65	53	21



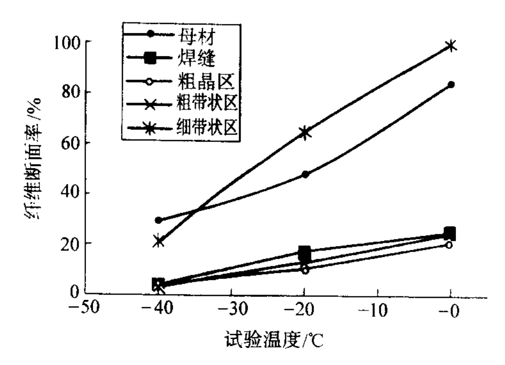


图 4.3-65　电渣压力焊接头冲击试验结果随试验温度的变化

以上结果表明，超细晶粒碳素钢Ⅲ级钢筋经过焊接后，接头区奥氏体晶粒的长大和组织粗化，虽不引起强度（或硬度）的下降，但却明显增加了缺口脆性。从钢筋的使用条件看，采用各种焊接方法获得的焊接接头都要求达到表面圆滑过渡，接头区不存在尖锐缺口，通常钢筋被混凝土包裹住，也不会受到集中的冲击载荷。因此对钢筋没有冲击功的考核指标。焊接接头拉伸、弯曲试验均未发生脆性破断，就是很好的证明。但这种缺口冲击韧性大幅度降低的现象，应当引起材料研究者的足够重视。

（2）超细晶粒碳素钢Ⅲ级钢筋闪光对焊

1）焊接工艺方法　钢筋闪光对焊是利用焊接电流通过两钢筋接触点产生的电阻热，使金属熔化，产生强烈飞溅、闪光，使钢筋端部产生塑性区和均匀的液体金属层，然后迅速施加顶锻力完成的一种压焊方法。其焊接质量取决于焊机的容量和操作技术水平。本试验在建筑工地，由施工现场技术工人操作，根据实践经验调整工艺参数。焊接设备为 UN1 - 150型闪光对焊机，采用预热闪光对焊，记录的工艺参数见表 4.3-35。

表 4.3-35　超细晶粒Ⅲ级钢筋闪光对焊主要参数

次级电压 /V	调伸长度 /mm	预热留量 /mm	闪光留量 /mm	顶锻留量 /mm	闪光时间 /s
7.17	40	6	12	7	8 ~ 12

2）闪光对焊接头拉伸和弯曲试验　表 4.3-36 是闪光对焊接头拉伸和弯曲试验的结果，与电渣压力焊的试验结果相同，$\sigma_b \geq 570$ MPa，达到Ⅲ级钢筋规定的抗拉强度指标。记录的 $\sigma_s > 400$ MPa。图 4.3-66 所示的拉伸应力 - 应变曲线记录表明：三个试样的强度相当，都有明显的均匀延伸和缩颈。由图 4.3-67 可见，三个拉伸试样的断裂位置都在远离焊缝的母材。拉伸断口形貌都呈杯锥状，具有明显的剪切唇区。采用 $4d$ 的弯心直径进行了冷弯试验，结果合格。因此，超细晶粒 III 级钢筋采用闪光对焊也可获得优质的焊接接头。

表 4.3-36 超细晶粒钢筋闪光对焊接头拉伸和弯曲试验结果

σ_b /MPa	σ_s /MPa	断裂位置距焊缝 /mm	拉伸后试件伸长 /mm	相对面缩 /%	弯曲 $d=4a$，90°
570	455	178	73	65.8	完好
575	435	117	78	51.2	完好
575	430	98	73	63.4	完好

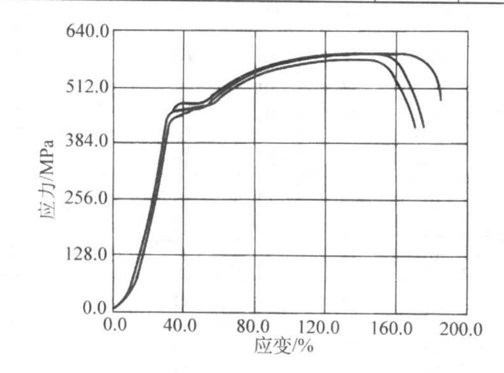
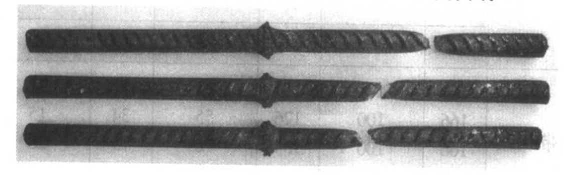
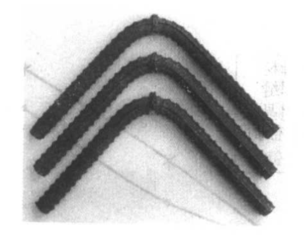


图 4.3-66 闪光对焊接头拉伸应力－应变曲线



(a) 拉伸试件



(b) 弯曲试件

图 4.3-67 钢筋闪光对焊接头拉伸和弯曲试件

3）闪光对焊接头硬度分布 钢筋闪光对焊接头纵剖面宏观形貌见图 4.3-68。接头中焊缝区为宽度小于 0.5 mm 的白亮窄带，这是由于闪光对焊过程在空气中完成，没有保护介质，加热端面的碳被强烈氧化，在接头周围生成 CO、CO_2 保护气体，同时内层的碳向加热端面扩散，顶锻时熔化金属被挤出，半熔化区内含碳量低的贫碳层被保留，形成焊缝。在焊缝两侧形成截面加强区，说明顶锻力足够大，除将全部的熔融金属从接头中挤出外，还使处于高温的金属发生了塑性变形。热影响区宽度约为 17 mm，可见焊接热输入较大。在热影响区内，原母材中部与边部的界面已不存在。

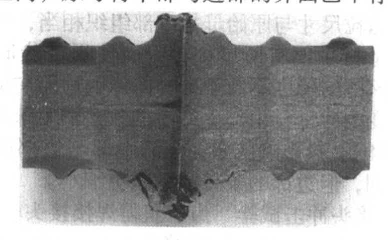


图 4.3-68 闪光对焊接头纵剖面宏观形貌

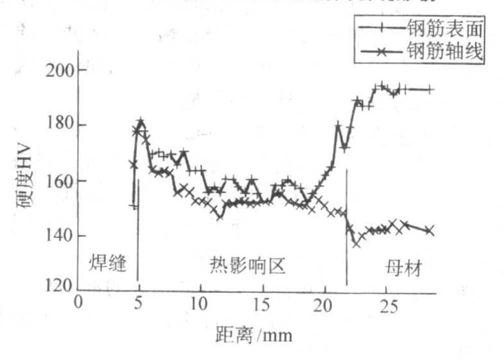
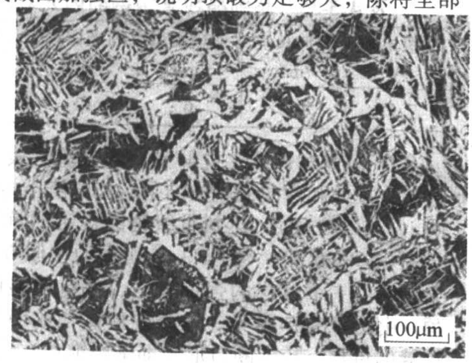


图 4.3-69 钢筋闪光对焊接头硬度分布

在闪光对焊接头纵截面上，分别沿距母材表面 2 mm（母材边部）处和钢筋轴线（母材中部）处测试硬度分布（图 4.3-69）表明：由于脱碳，焊缝的硬度较低。热影响区中，硬度随距熔合线距离的变化规律与电渣压力焊时基本相同。但闪光焊在轴线处的硬度高于电渣压力焊。因此，超细晶粒碳素钢钢筋闪光对焊接头也不存在软化问题。

4）焊接接头金相组织 图 4.3-70 为闪光对焊接头纵剖面上各区的典型组织形貌。图 a 显示，中间白亮带为焊缝，两侧是热影响区粗晶区组织。由于焊缝中有轻微脱碳，其组织主要是粗大的针状铁素体和块状铁素体，只有少量的珠光体存在，晶粒尺寸明显大于母材的晶粒，但其硬度不低于中部母材的硬度。由于采用预热闪光焊，加热速度比较慢，闪光过程中高温维持时间较长，使得热影响区粗晶区的奥氏体晶粒长大比较严重。但相对于电渣压力焊的粗晶区，奥氏体晶粒要小得多。由图 b 可见，在熔合线附近的粗晶区，先共析铁素体沿奥氏体晶界分布，晶内主要有粗大针状铁素体和珠光体。在这一区域中，钢筋的中部与边部的组织没有差别。

随着距熔合线距离的增加，其组织的变化与电渣压力焊时有着相同的变化规律，只是大块状铁素体和粗大针状铁素体的数量更多些。

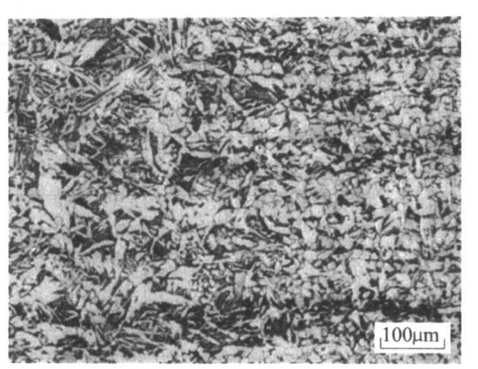


(a) 焊缝

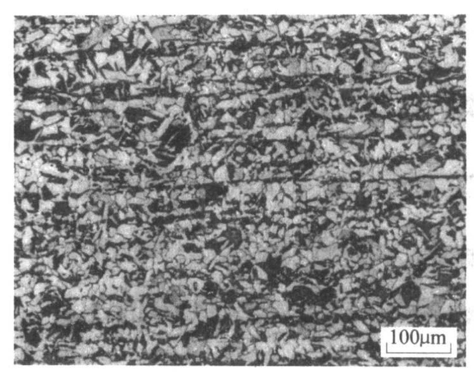


(b) HAZ粗晶区

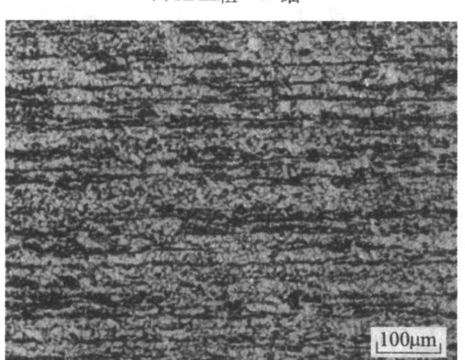
图 4.3-70 钢筋闪光对焊接头组织形貌



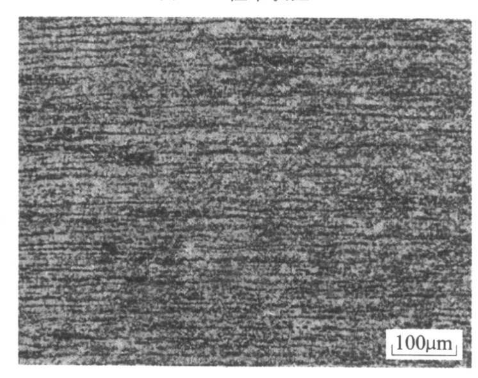
(c) HAZ粗 → 细



(d) HAZ粗带状区



(e) 钢筋中部HAZ细带状区



(f) 钢筋边部HAZ细带状区

续图 4.3-70

根据组织的变化判断，闪光对焊时在高温区的停留时间比电渣压力焊时短，但后期的冷却速度要比电渣压力焊时慢，因而得到比电渣压力焊的奥氏体晶粒小、转变产物粗的组织。

5）闪光对焊焊接接头冲击试验　根据闪光对焊接头的组织分布情况，焊缝及粗晶区的组织与电渣压力焊接头有较大差别，其他区域的组织与电渣压力焊时相近，因此选取冲击缺口位于焊缝和熔合线外侧粗晶区两个典型部位进行试验。

闪光对焊接头冲击试验结果列于表 4.3-37。

表 4.3-37　闪光对焊接头冲击试验结果

缺口位置	0℃		-20℃		-40℃	
	A_{KV}/J	纤维断面率/%	A_{KV}/J	纤维断面率/%	A_{KV}/J	纤维断面率/%
焊缝	6	6	6	5	5	5
	7	5	6	6	5	2
	8	14	5	3	5	2
	7	8	6	5	5	3
熔合线外粗晶区	8	11	6	3	8	0
	12	9	6	6	6	0
	15	22	5	3	5	0
	12	14	6	4	6	0

闪光对焊接头在焊缝及熔合线外侧粗晶区的缺口冲击几乎完全处于脆性状态，比电渣压力焊相应部位的性能更差。这是由于闪光焊过程完全暴露在大气中，在高温下焊缝附近的金属被污染，有些元素被烧损造成的结果。

同样，闪光对焊接头的拉伸试验和弯曲试验均未发生脆性破断，不影响其使用的承载能力。

(3) 超细晶粒碳素钢Ⅲ级钢筋电弧焊

1）电弧焊焊接工艺方法　采用抗拉强度为 550 MPa 级的 J556RH（E5516－G）焊条，直径为 ϕ4.0 mm。焊接电流 168～175 A，焊接电压 26～27 V。进行连续多道焊接。由图 4.3-71 可见，经过连续焊接后，坡口焊接头热影响区的宽度明显增加了。

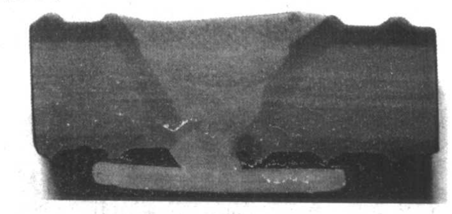


图 4.3-71　坡口焊接头纵截面宏观形貌

2）电弧焊接头拉伸试验　表 4.3-38 及图 4.3-72、图 4.3-73 为电弧焊接头拉伸试验结果，四种接头拉伸试件的断裂位置都在远离焊缝的母材，都有明显的均匀延伸和缩颈。抗拉强度同样都达到Ⅲ级钢筋规定的抗拉强度指标，获得优质的焊接接头。

3）电弧焊接头硬度分布　分别沿熔槽帮条焊、坡口焊接头纵剖面距母材表面 2 mm 处和钢筋轴线处测试硬度分布（见图 4.3-74），可以看到具有与电渣压力焊和闪光焊同样的分布规律，只是热影响区的宽度减小了。电弧焊接头不存在软化问题。

表 4.3-38　超细晶粒钢筋电弧焊接头拉伸试验结果

接头形式	σ_b/MPa	σ_s/MPa	断裂位置距焊缝/mm	拉伸后试件伸长/mm	断面收缩率/%
帮条焊	570～575	435～440	70～85	56～66	62～66
搭接焊	570～575	435～445	69～102	59～72	63～67
熔槽帮条焊	570	430～435	98～135	52～63	63～64
坡口焊	570～575	425～435	66～91	60～68	62～68

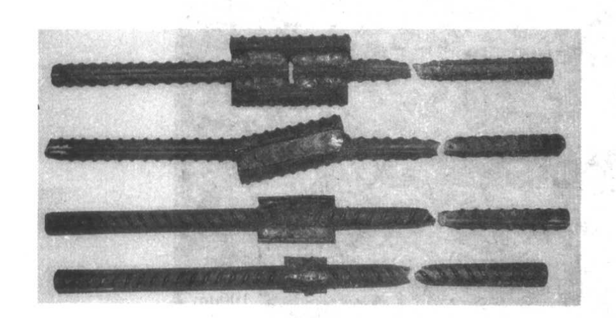


图 4.3-72 四种电弧焊接头拉伸试件

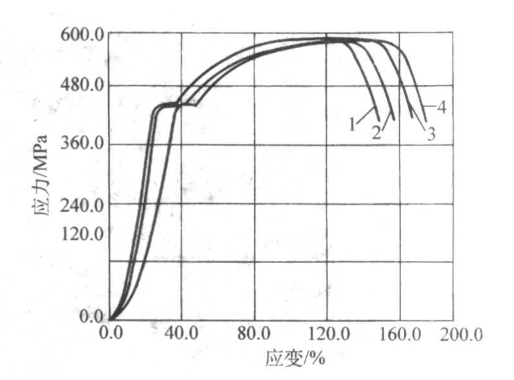
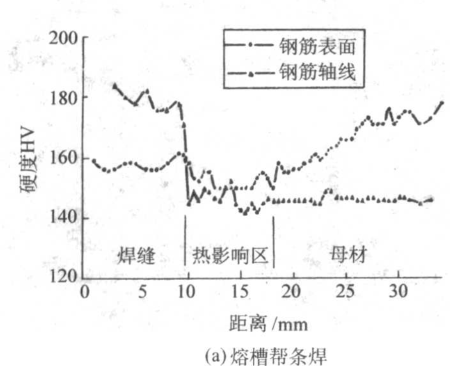
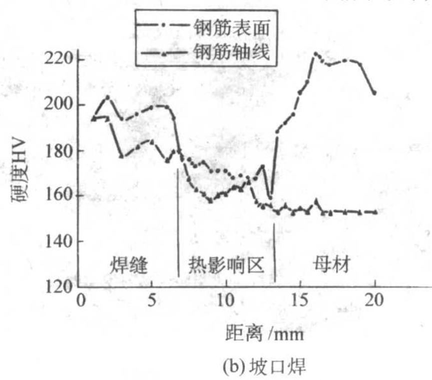


图 4.3-73 四种电弧焊接头拉伸应力－应变曲线

1—帮条焊；2—搭接焊；3—熔槽帮条焊；4—坡口焊



(a) 熔槽帮条焊



(b) 坡口焊

图 4.3-74 电弧焊接头硬度分布

4）电弧焊接头冲击试验 按 JGJ/T 27—2001《钢筋焊接接头试验方法标准》规定，在本研究采用的四种电弧焊接头中，只对坡口焊要求进行冲击试验。其中熔合线的冲击取样方法如图 4.3-75 所示，在钢筋横截面中心截取试样，腐蚀确定熔合线的部位，在上焊口面上精心画线确定缺口位置，使缺口尖端恰好位于熔合线上，这样，冲击断口几乎穿越了热影响区的各个区域，代表了焊接热影响区的综合性能。

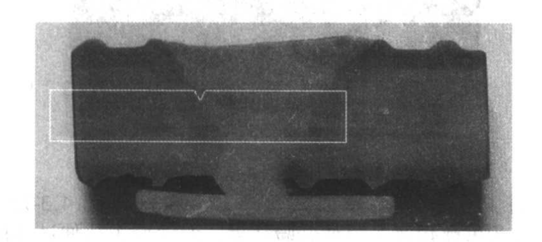


图 4.3-75 坡口焊熔合线冲击试样缺口位置

表 4.3-39 坡口焊接头热影响区冲击试验结果

缺口位置	0℃		－20℃		－40℃	
	A_{KV}/J	纤维断面率/%	A_{KV}/J	纤维断面率/%	A_{KV}/J	纤维断面率/%
熔合线	150	100	91	62	46	37
	158	100	86	60	50	37
	169	100	65	46	26	38
	159	100	81	56	41	37

坡口焊接头热影响区的冲击试验结果列于表 4.3-39。将其结果与钢筋母材的冲击性能结果共同作图 4.3-76，可以清楚地看到无论是冲击功还是纤维断面率，坡口焊接头都位于钢筋母材冲击性能结果的上方，其缺口韧性略高于母材，并且随试验温度的变化趋势也相同，几乎与母材平行变化。电弧焊接头热影响区的奥氏体晶粒尺寸及转变产物都比电渣压力焊和闪光焊要细小得多，缺口韧性也有明显提高。因此，超细晶粒碳素钢Ⅲ级钢筋电弧焊可以获得综合性能优良的焊接接头。

图 4.3-76 电渣压力焊接头冲击试验结果随试验温度的变化

3.4.4 超细晶粒钢筋焊接接头的疲劳试验

试验按照中国建设部 JGJ/T27—2001《钢筋焊接接头试验方法标准》进行。试件受试长度 500 mm。试件两端夹持部分连接细牙螺纹与试验机夹头配合。试验设备为 30 t 高频疲劳试验机，型号 PLG300。



试验在常温下进行，疲劳频率约110左右。试验应力比为0.2。在试验应力循环次数超过 2×10^6 次时，试验过程自动停止。试验过程中，如夹头部位发生断裂造成试验停顿，需重新连接螺纹夹头，循环次数累计，但这种中断均不超过3次。所有焊接试件的断裂均发生在焊趾部位或焊接热影响区。

根据试验结果整理的焊接接头疲劳试验 $S-N$ 曲线如图4.3-77所示。

试验结果表明，两种焊接方法完成的焊接接头有相同的条件疲劳极限，极限值的疲劳最大应力为153 MPa。闪光对焊接头的疲劳寿命略高于电渣压力焊接头。原因与焊趾部位的过渡角度或应力集中程度有关，电渣压力焊接头的过渡角度小于90°，而闪光焊接头的过渡角大于90°，造成电渣压力焊接头的焊趾几何应力集中程度大于闪光焊接头。

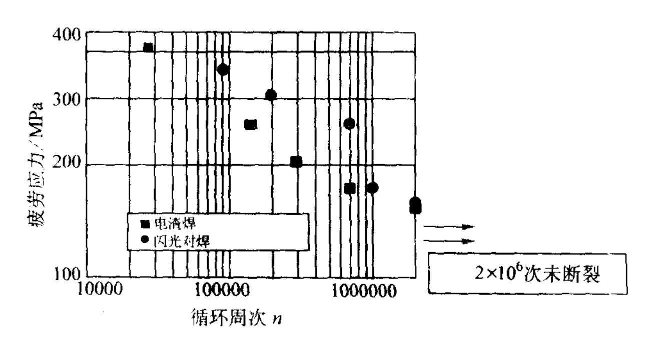


图4.3-77 钢筋焊接接头疲劳试验 $S-N$ 曲线（应力比 $R=0.2$）

从以上研究，可以看出：

1）超细晶粒碳素钢Ⅲ级钢筋经过电渣压力焊、闪光对焊和电弧焊，焊接接头的拉伸性能：σ_b 为570～580 MPa，σ_s 为415～455 MPa。断裂位置都发生在母材，断口特征为延性，有颈缩和明显的屈服，比普通Q235钢筋的强度有大幅度提高，达到Ⅲ级钢筋的强度水平，满足JGJ18—96《钢筋焊接及验收规程》中对拉伸试件断裂位置和断裂方式以及弯曲性能的规定。

2）由于超细晶粒碳素钢钢筋采用控制轧制和穿水冷却工艺生产，钢筋边部与中部的组织和硬度不同。经过焊接热循环的作用，边部热影响区发生软化，但不低于钢筋中部母材的硬度，钢筋轴线部位则不发生软化。因此从总体上看，超细晶粒碳素钢钢筋焊接接头不存在软化问题。

3）超细晶粒碳素钢钢筋经过电渣压力焊和闪光对焊，焊缝及热影响区粗晶区的奥氏体晶粒明显长大，组织明显粗化，虽然未引起强度（或硬度）的下降，但却显著增加了缺口脆性。尤其是闪光对焊，焊接过程没有保护，冲击功异常低，表现出明显的脆性。电弧焊接头热影响区的奥氏体晶粒尺寸及转变产物都比电渣压力焊和闪光焊要细小得多，缺口韧性也明显提高。尽管JGJ18—96《钢筋焊接及验收规程》中对钢筋焊接接头没有冲击功的考核指标，焊接接头拉伸、弯曲试验均未发生脆性破断，但这种缺口冲击韧性大幅度降低的现象，应当引起材料研究者的足够重视。

4）闪光对焊和电渣压力焊焊接接头有相同的条件疲劳极限，极限值的疲劳最大应力为153 MPa。闪光对焊接头的疲劳寿命略高于电渣压力焊接头。

5）超细晶粒碳素钢钢筋采用电渣压力焊试验的成功，为把电渣压力焊方法应用于Ⅲ级钢筋奠定了基础。

4 800 MPa级超细晶粒钢的焊接性

应用弛豫－析出－控制（RPC）相变技术可得到800 MPa级强度的结构钢。其基本原理是：以低碳贝氏体钢（C－Mn－Nb系微合金钢）为原型，终轧后充分利用非再结晶区大量变形的高密度位错，适当空冷再加速冷却使位错弛豫，在弛豫过程中形成大量细小的位错胞状结构（微米级的亚结构）。通过微合金元素（Nb、Ti、B）在这些微结构上的应变诱导析出（非平衡偏聚与析出），使钢种在相变前晶内产生大量相变形核优先位置，促使随后的加速冷却过程中晶内贝氏体在这些位置优先形成。这些优先形成的贝氏体板条把变形奥氏体晶粒分割成许多细小区域，从而限制了后续的相变在这些小区域中进行，最终得到充分细化的复合组织（亚微米级的贝氏体、马氏体复合组织）。这种新型结构钢，不仅具有高的强度，而且具有高的韧性。

4.1 弛豫热处理（RPC）超细组织钢的成分及组织特征

从成本及环保考虑出发，RPC超细组织钢尽量降低合金元素的含量，其强化主要通过微合金元素复合加入技术来实现。表4.3-40为一种试验用12 mm RPC钢板的化学成分。

表4.3-40 试验用RPC钢的化学成分（质量分数） %

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo	Nb	Ti	B
0.04	0.33	1.59	0.008	0.005	0.29	0.285	0.25	0.053	0.030	0.003

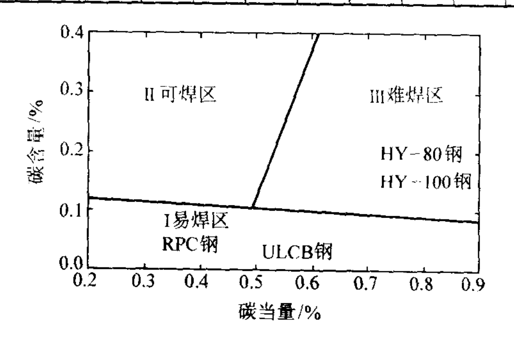


图4.3-78 Graville焊接性评价图

该钢种碳当量一般小于0.4%，在Graville图上处于焊接时HAZ冷裂纹不敏感的第Ⅰ区即易焊区内（见图4.3-78）。

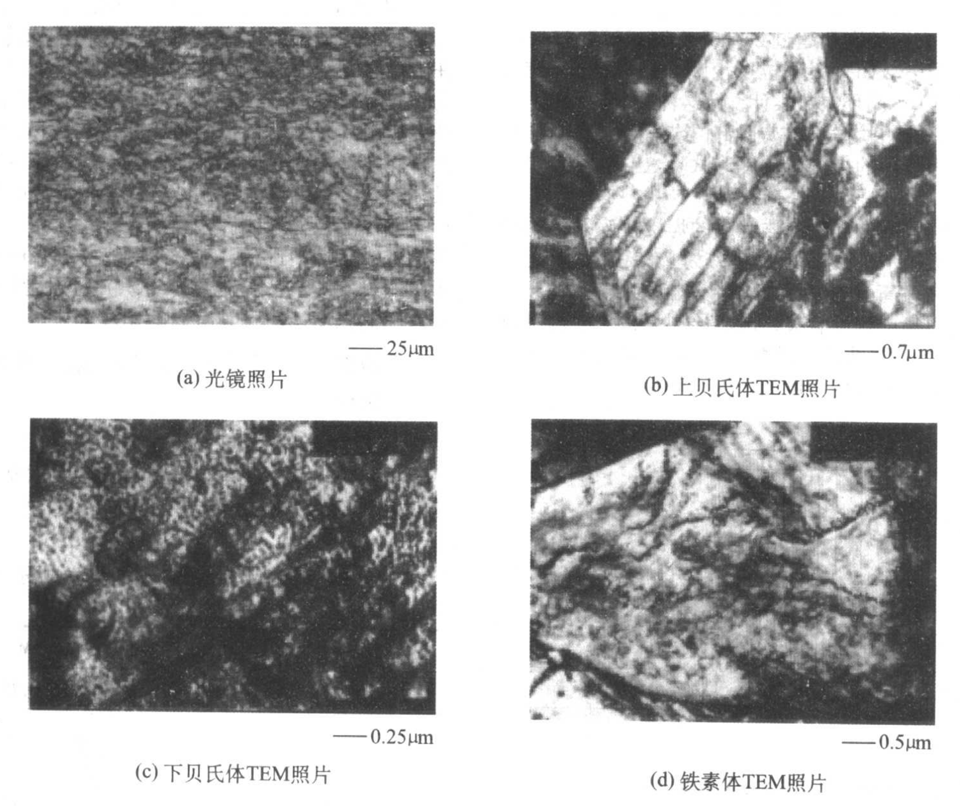
在光学显微镜下观察可发现其组织为贝氏体和少量铁素体，平均晶粒尺寸在4～6 μm（图4.3-79a）。利用透射电镜进一步进行观察，可以看到上贝氏体和下贝氏体共存的组织（图4.3-79b、c），另外有少量铁素体（图4.3-79d）。

4.2 800 MPa级新一代钢焊接热影响区组织变化规律

为了较全面地研究800 MPa级新一代钢焊接热影响区性能、组织变化的基本特征和规律，进行了系列焊接热模拟试验。通过焊接SH－CCT曲线的测试，研究了不同焊接规范条件下的热影响区相变特征和性能变化，并对奥氏体组织的长大进行了定量分析。利用热模拟试验设备进行了不同峰值温度、不同热输入的焊接热模拟试验，对800 MPa级新一代钢焊接热影响区的性能变化规律有了较深入的了解。

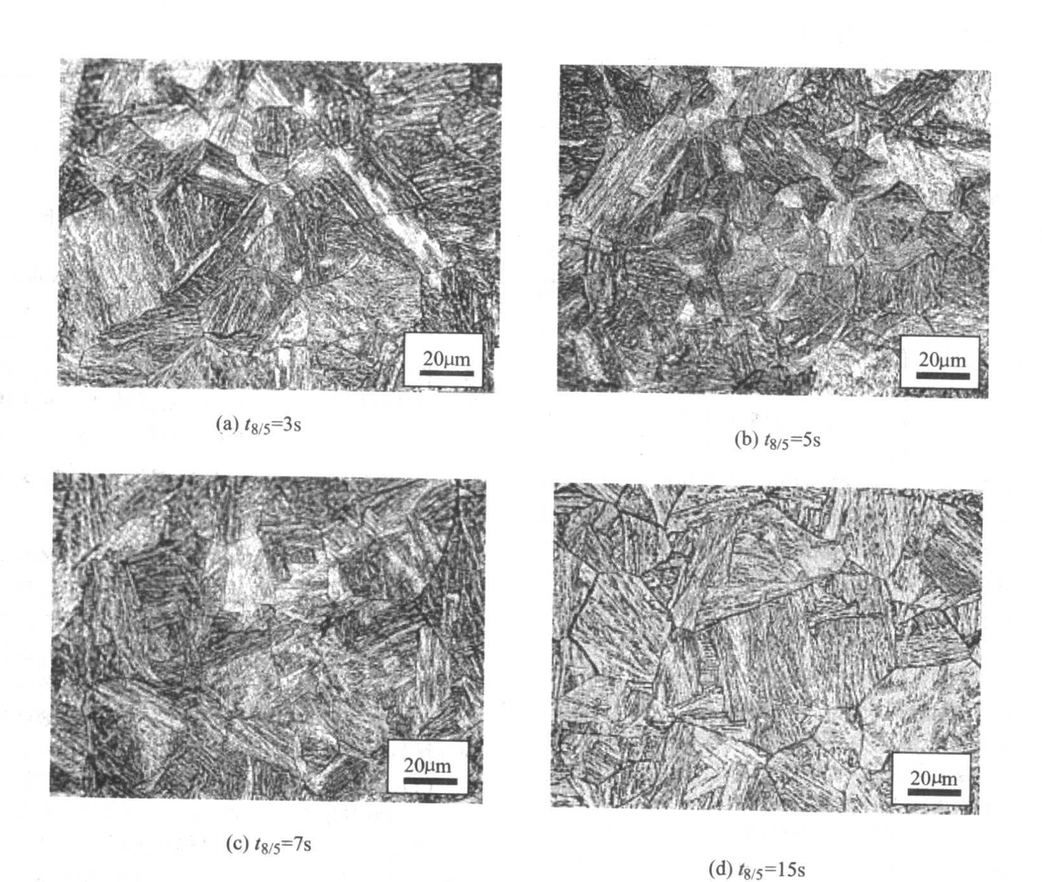
（1）800 MPa级新一代钢焊接连续冷却转变曲线

1）800 MPa新一代钢SH－CCT试样组织分析 不同热循环规范条件下热影响区过热区的模拟组织变化如图4.3-80所示。在较快的冷却条件下，焊接热影响区有马氏体组织产生（$t_{8/5}=3\sim7$ s），但在相当宽的范围内，热影响区组织为贝氏体，只有在 $t_{8/5}\geq500$ s时，过热区才出现少量的珠光体组织。



(a) 光镜照片　(b) 上贝氏体TEM照片
(c) 下贝氏体TEM照片　(d) 铁素体TEM照片

图 4.3-79　800 MPa RPC 超细晶钢母材组织



(a) $t_{8/5}$=3s　(b) $t_{8/5}$=5s
(c) $t_{8/5}$=7s　(d) $t_{8/5}$=15s

图 4.3-80　800 MPa 新一代钢系列冷却条件下的模拟热影响区组织

(e) $t_{8/5}$=27s　　(f) $t_{8/5}$=45s

(g) $t_{8/5}$=70s　　(h) $t_{8/5}$=100s

(i) $t_{8/5}$=200s　　(j) $t_{8/5}$=300s

(k) $t_{8/5}$=500s　　(l) $t_{8/5}$=1200s

(m) $t_{8/5}$=2500s　　(n) 基材

续图 4.3-80

2）800 MPa 新一代钢 SH－CCT 试样硬度　对 800 MPa 新一代钢 SH－CCT 图试样进行了硬度测试。硬度随 $t_{8/5}$ 的变化曲线如图 4.3-81 所示。从图中可以看出，800 MPa 新一代钢在 $t_{8/5}>38$ s 后，热影响区 1 300℃处的硬度低于基材。同时从硬度曲线中可以看出，800 MPa 在 $t_{8/5}=5$ s 时硬度仅为 289 HV，这种硬度组织与一般低碳马氏体组织硬度相差较大，有待进行微细组织分析。

3）800 MPa 新一代钢 SH－CCT 曲线　800 MPa 新一代钢 SH－CCT 曲线如图 4.3-82 所示，虚线表示估计的珠光体转变点。从曲线所反映的规律可以看出，800 MPa 新一代钢的焊接热影响区组织主要为贝氏体。在较快的冷却速度下，出现了马氏体组织。对比组织分析可以发现，在相当大的焊接规范范围内（$t_{8/5}=15\sim100$ s），热影响区组织具有相似的组织特征，主要区别在于贝氏体中岛状相形态的不同。因此，800 MPa 新一代钢在较大的规范范围内，焊接热影响区性能相近，其岛状相的取向特征较为明显，对其冲击韧性有不利影响。

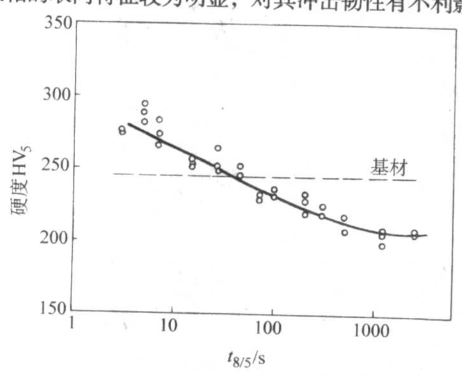


图 4.3-81　热影响区硬度变化曲线图

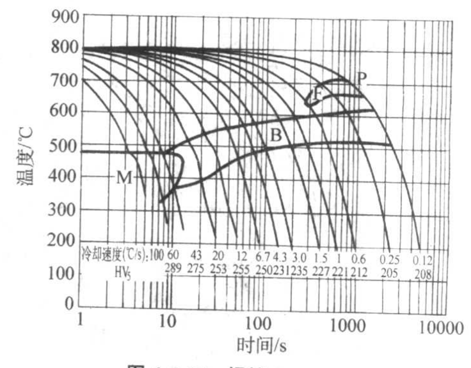


图 4.3-82　焊接 SH－CCT

4）800 MPa 新一代钢焊接热模拟组织奥氏体尺寸定量分析　利用 IBAS－2000 图像分析仪对 SH－CCT 测试试样进行了奥氏体尺寸定量分析。在最高温度为 1 300℃时，800 MPa 新一代钢的奥氏体尺寸较小，在 $t_{8/5}\leqslant200$ s 时，奥氏体平均尺寸小于 45 μm。当 $t_{8/5}>200$ s 后，奥氏体长大趋势较为明显，但即使在 $t_{8/5}=2\,500$ s，奥氏体平均尺寸也仅为65 μm。这说明 800 MPa 新一代钢焊接热影响区 1 300℃处的晶粒尺寸长大倾向并不显著。

（2）RPC 超细组织钢 HAZ 的显微组织

表 4.3-41　试验用焊接工艺参数表

试样号	焊接方法	U/V	I /A	送丝速度 /m·min^{-1}	焊接速度 /mm·s^{-1}	焊道长度 /mm	热输入 /kJ·cm^{-1}	$t_{8/5}$ /s
1#	SMAW	27	172	—	1.93	58	24	—
2#	GMAW	33.5	310	10.5	5.08	120	20	28
3#	PGMAW1	34	325	11.2	5.08	96	21	20
4#	PGMAW2	33.9	326	11.2	4.33	105	25.5	38
5#	PGMAW3	33.9	327	11.2	7.33	105	15	10

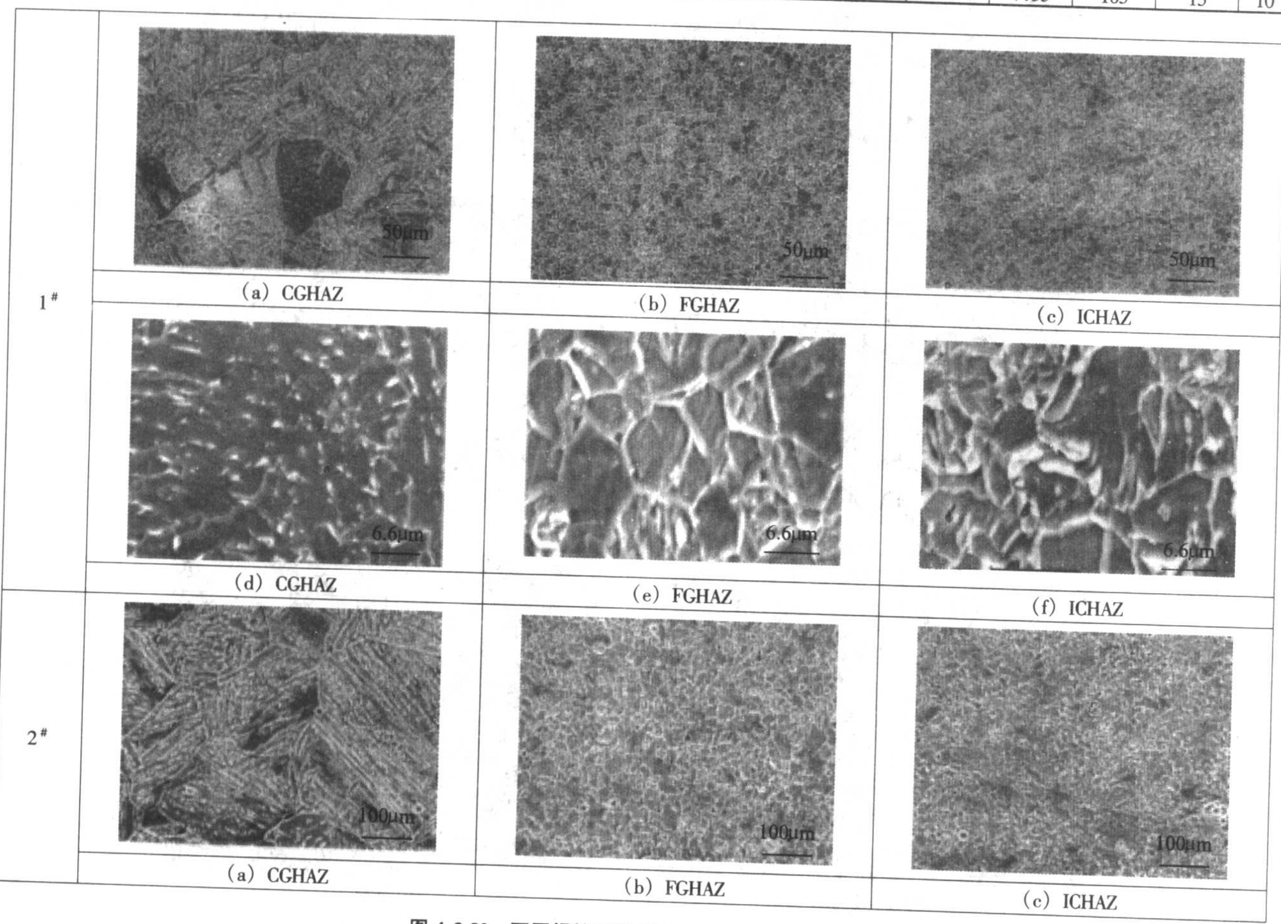
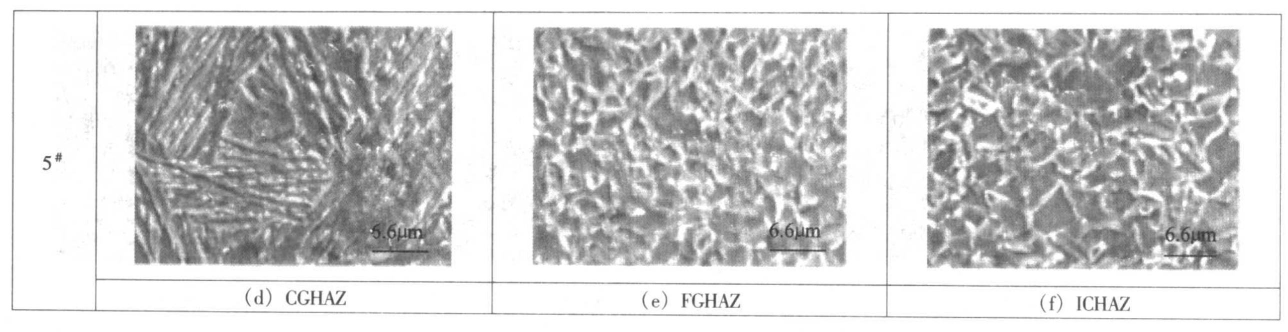


图 4.3-83　不同焊接工艺下 HAZ 的扫描电镜照片



2#	(d) CGHAZ	(e) FGHAZ	(f) ICHAZ
3#	(a) CGHAZ	(b) FGHAZ	(c) ICHAZ
	(d) CGHAZ	(e) FGHAZ	(f) ICHAZ
4#	(a) CGHAZ	(b) FGHAZ	(c) ICHAZ
	(d) CGHAZ	(e) FGHAZ	(f) ICHAZ
5#	(a) CGHAZ	(b) FGHAZ	(c) ICHAZ

续图 4.3-83



(d) CGHAZ (e) FGHAZ (f) ICHAZ

续图 4.3-83

图 4.3-83 是不同焊接工艺条件（见表 4.3-41）下，RPC 钢 HAZ 不同特征区域的 SEM 照片。

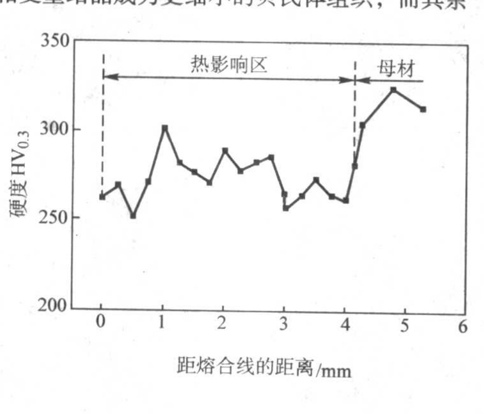
可以看出，在采用的热输入范围内，RPC 钢焊接 HAZ 既不会生成晶界先共析铁素体，也不会生成马氏体类组织。不同工艺参数下，CGHAZ 的平均晶粒尺寸没有明显的差别。根据估计，CGHAZ 的平均晶粒尺寸约为 70～80 μm。与传统钢种相比，这样的 CGHAZ 晶粒尺寸显然很小，这很可能是由于钢中添加了微合金元素 Ti，Nb，B 等的结果。RPC 钢的焊接 HAZ 组织均由贝氏体类组织组成，其原始奥氏体晶界十分清晰，在奥氏体晶粒内部存在大量的岛状和粒状的二次相。这些第二相粒子在 HAZ 不同的特征区具有不同的形态，它们的沉淀析出和溶解行为随着热输入的变化而改变，必将对 HAZ 的性能产生显著影响。深入研究发现，所有工艺下的 CGHAZ 组织明显是由板条状贝氏体和粒状贝氏体组成的，不同试样组织的差别主要在于贝氏体板条和粒状贝氏体所占比例的不同。不同方向的贝氏体板条束将原始奥氏体晶粒分割成不同的尺寸区域，岛状或粒状的第二相在这些细小区域内沉淀析出，并且呈排状分布。仔细观察可以发现，随着热输入的增大，二次相颗粒的尺寸逐渐增大，贝氏体板条束所占的比例逐渐减小，粒状贝氏体的特征变得愈加明显。FGHAZ 的组织特征是，晶粒细小均匀，晶粒内部板条状结构隐约可见，岛状或粒状二次相的数量大大减小，绝大多数晶粒内部存在一些细小的黑色粒子，其特性有待深入研究（见图 4.3-83）。另外，FGHAZ 中有一些白色的块状组织形成，这些块状组织内部并没有沉淀物粒子析出，某种程度上类似于块状铁素体。ICHAZ 的组织类型与 CGHAZ 的组织相近，但是由于其热循环峰值温度处于 A_{c3} 和 A_{c1} 之间，与 CGHAZ 相比，其晶粒尺寸减小，但是大小不均匀。在光学显微镜下，轧制方向可以明显看出，这是由于随着焊接热循环峰值温度进入 A_{c3} 和 A_{c1} 之间，一部分较不稳定的变形贝氏体晶粒发生相变重结晶成为更细小的贝氏体组织，而其余一部分贝氏体晶粒较稳定，其光学显微形貌并不发生变化，仅仅发生某些亚结构的变化，如位错密度降低及多边形化等。

(3) RPC 超细组织钢 HAZ 的硬度

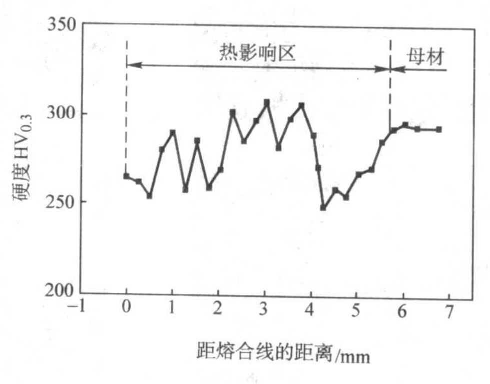
焊接热影响区的硬度主要取决于被焊钢种的化学成分及焊接时的冷却条件，不同的硬度水平反映了不同组织的性能。由于硬度测试简便易行，研究中常用来间接预测焊接热影响区的强度、韧性及抗裂性等。由于这里重点考察母材焊接热影响区的硬度受热输入影响的变化程度，而且通常对于一条焊道，其两侧的焊接热影响区硬度变化趋势是对称的，因此这里仅从焊道一侧的熔合线开始，一直到母材逐点测试硬度的变化趋势。

不同焊接条件下的硬度测试结果见图 4.3-84a～e。可以看出，热输入和 $t_{8/5}$ 对 RPC 钢焊接热影响区显微硬度的影响是显著的。随着热输入和 $t_{8/5}$ 的增加，焊接热影响区的软化倾向逐渐明显，当热输入和 $t_{8/5}$ 分别达到 25.5 kJ/cm 和 38 s 时，整个焊接热影响区都发生软化。此时，软化区的宽度达到 6.3 mm（见图 4.3-84d），这将导致焊接接头强度的下降。当采用较低的热输入和 $t_{8/5}$ 时，软化区的宽度大大减小。根据试验结果，如果采用 GMAW 和 PGMAW 工艺，热输入和 $t_{8/5}$ 分别低于 25.5 kJ/cm 和 38 s 时，软化区的宽度将小于 1 mm。一般来说，如果软化区宽度比较窄，而且处于强体之间，它的塑性变形将受到周围强体的拘束，软化区的不利影响将被抑制，这将大大改善焊接热影响区的性能。

当采用 GMAW 和 PGMAW 工艺时，随着热输入和 $t_{8/5}$ 的增加，焊道的宽度、深度，焊接热影响区的宽度和软化区的宽度逐渐增大。对于 SMAW 工艺例外，它的热输入高达 24 kJ/cm，而焊接热影响区的尺寸小，仅为 1.2 mm，这可能是由于与 GMAW 和 PGMAW 工艺相比，SMAW 工艺热源效率低，使得焊后冷却时间 $t_{8/5}$ 较小造成的。

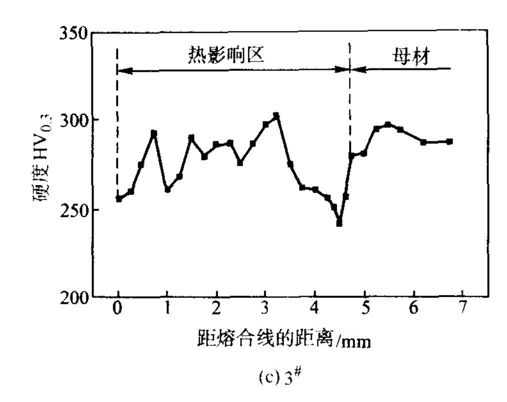


(a) 1#

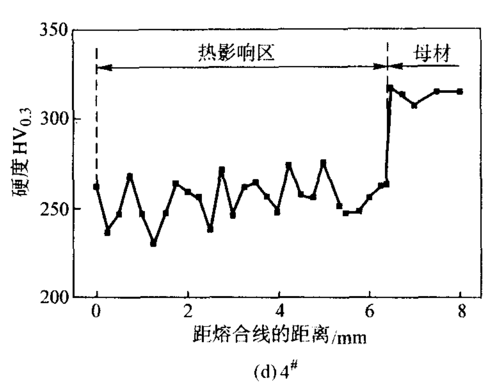


(b) 2#

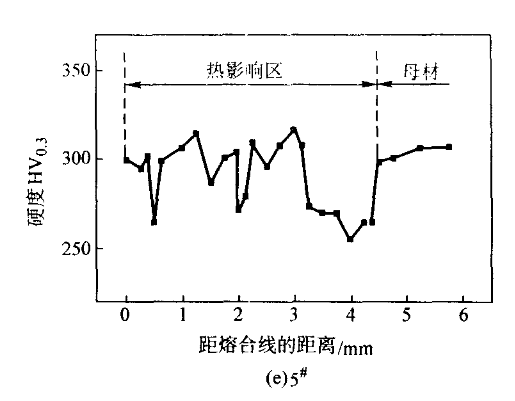
图 4.3-84 焊接热影响区硬度变化曲线



(c) 3#



(d) 4#



(e) 5#

续图 4.3-84

4.3　鞍钢 20 mm 厚 RPC 钢板焊接接头组织与性能

(1) 母材与熔敷金属的化学成分和力学性能

1) 鞍钢 RPC 钢板的化学成分和力学性能　(表 4.3-42 和表 4.3-43)

表 4.3-42　试验用钢的化学成分（质量分数）%

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo	Nb	Ti	B	Al	N
0.035	0.25	1.50	0.012	0.003	0.54	0.30	0.16	0.043	0.021	0.0017	0.029	0.0029

表 4.3-43　试验用钢的力学性能

取样方式	σ_s/MPa	σ_b/MPa	δ/%	A_{kv}/J		冷弯
				-20℃	-40℃	
纵向	750	790	17	215	129	合格
横向	750	805	16.5	170	131	

2) 熔敷金属的化学成分及力学性能　(表 4.3-44 和表 4.3-45)

表 4.3-44　ULCB 焊丝熔敷金属的化学成分（质量分数）%

焊丝	C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo	Ti	B	Cr
W8	0.046	1.81	0.20	0.006	0.005	3.84	0.78	0.006	0.0023	0.0114

表 4.3-45　ULCB 焊丝熔敷金属性能表

$\sigma_{p0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%	A_{KV}（-50℃）/J
790	840	18.5	66.5	109、117、119

(2) 焊接接头光学显微组织照片

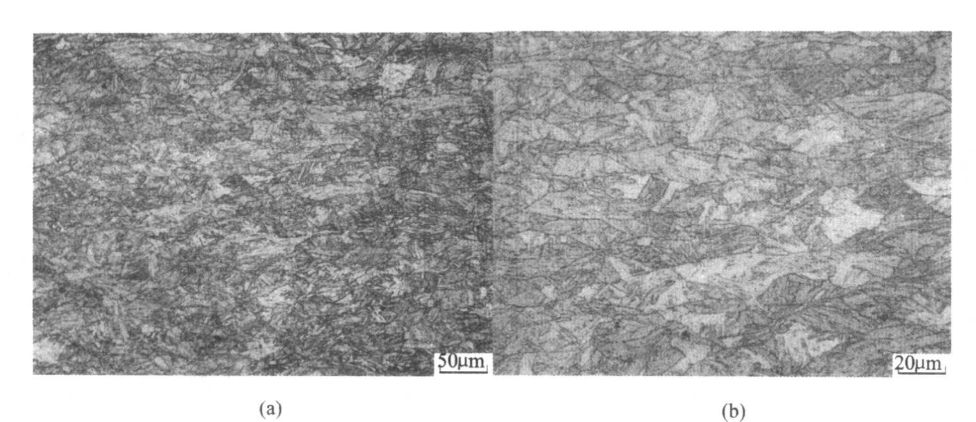
图 4.3-85 是鞍钢 20 mm 厚 RPC 钢母材光学金相组织照片，其组织组成及组织形貌与武钢 12 mm 厚 RPC 钢母材组织相同，这里不再详述。图 4.3-86 是 20 mm 厚 RPC 钢焊接热影响区光学金相照片，由于是连续拍摄，图 4.3-86a～j 给出了从母材到焊接热影响区再到熔合线及焊缝的完整的光学金相组织照片。明显可以看出 20 mm 厚 RPC 钢的焊接热影响区主要由不完全重结晶区、细晶区和粗晶区三个区域构成，而且其细晶区和不完全重结晶区占有较大比例，粗晶区仅占有较小的比例。

图 4.3-87 是焊缝金属典型光学金相组织照片。其中图 a～d 是焊接接头背面焊道的典型组织照片，由于背面焊缝是单道焊一次完成，所以其组织特征代表了 W8 焊丝与 20 mm厚 RPC 钢母材所组成焊缝的原始组织特征。图 4.3-87e～g是焊接接头正面焊道表层焊道的典型组织照片，具有同背面焊道相同的组织特征。可以看出焊缝金属表层组织主要是由针状铁素体、板条贝氏体和粒状贝氏体组成的，其中针状铁素体占很大比例，而板条贝氏体和粒状贝氏体所占比例很小。由于正面焊缝为多道焊缝，图 4.3-87h～j 分别给出了原始焊缝组织经受 1～3 次焊接热循环的典型组织照片，可以看出随着经受热循环次数的增加，焊缝金属的组织特征发生明显改变，焊缝金属中针状铁素体的长宽比减小，数量也逐渐减少，板条贝氏体和粒状贝氏体的数量逐渐增多。图 4.3-87k～l 为焊缝金属心部未受焊接热循环影响区域的典型组织照片，可以看出其具有同表层焊道相似的组织特征。

(3) MAG 焊接头的力学性能

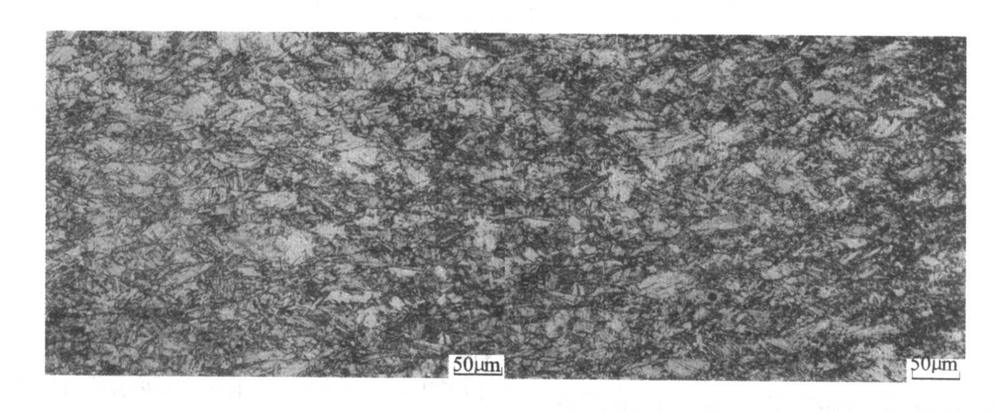
采用 MAG 焊接工艺以 20 kJ/cm 的线能量焊接试板，焊接接头的抗拉强度为 σ_b = 810 MPa，焊缝金属的拉伸及接头弯曲试验结果见表 4.3-46，焊接接头各部位的冲击试验结果见表 4.3-47。

从焊接接头的拉伸、弯曲及低温冲击试验结果可以看出，应用新研制的 ULCB 焊丝焊接 20 mm 厚 RPC 钢，焊接接头不但获得了高的强度（焊缝金属的抗拉强度略高于母材的抗拉强度），而且获得了足够的塑性和韧性储备，尤其是焊缝金属低温韧性优良。

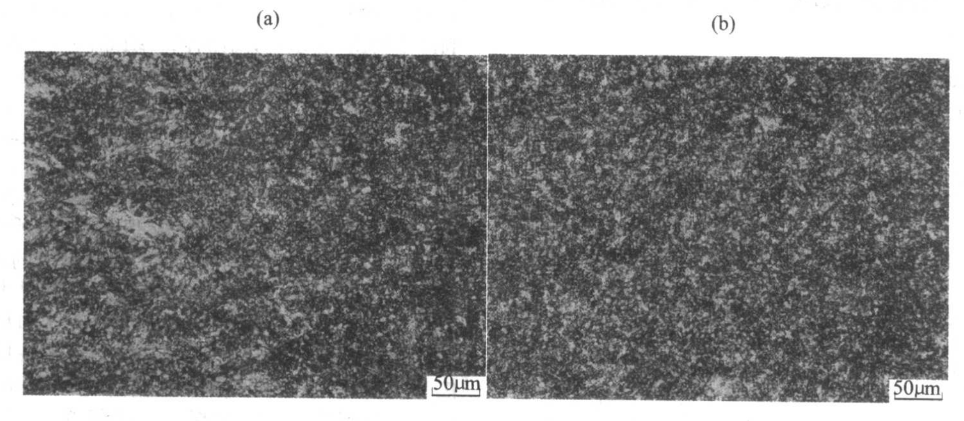


(a) (b)

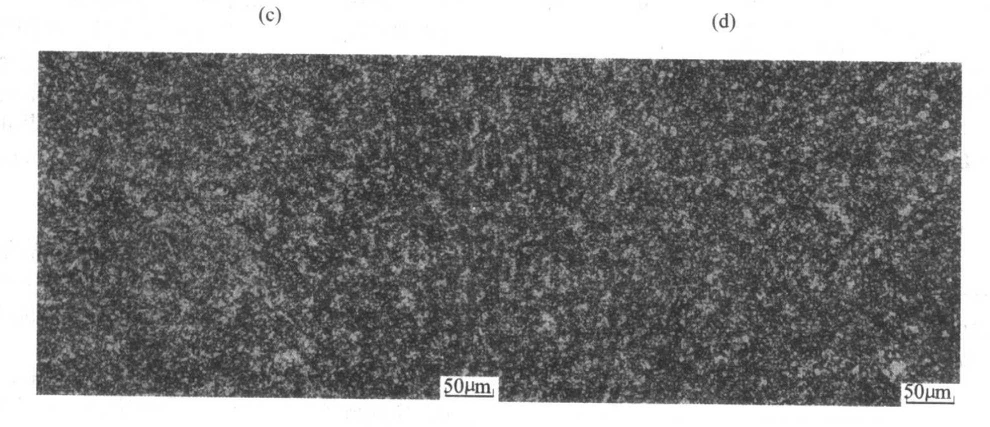
图 4.3-85 鞍钢 RPC 超细组织低合金钢母材光学金相组织



(a) (b)



(c) (d)



(e) (f)

图 4.3-86 焊接热影响区光学金相照片

50μm　　50μm

(g)　　(h)

50μm　　50μm

(i)　　(j)

续图 4.3-86

20μm　　20μm

(a)　　(b)

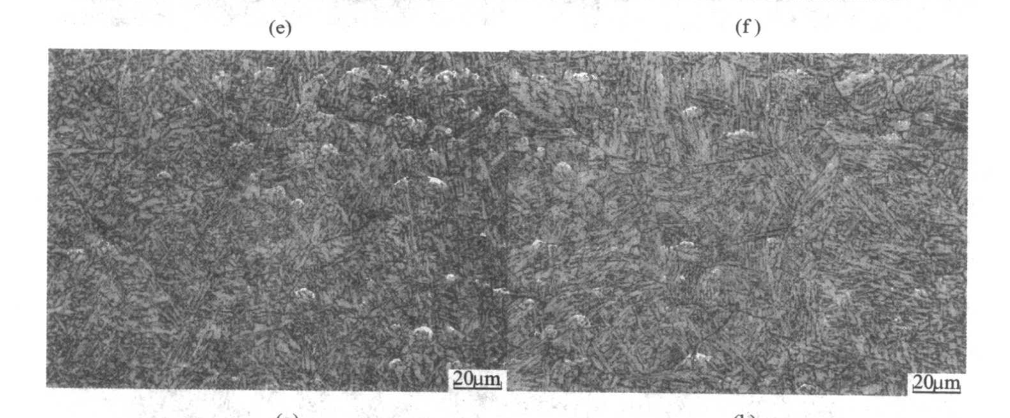
20μm　　20μm

(c)　　(d)

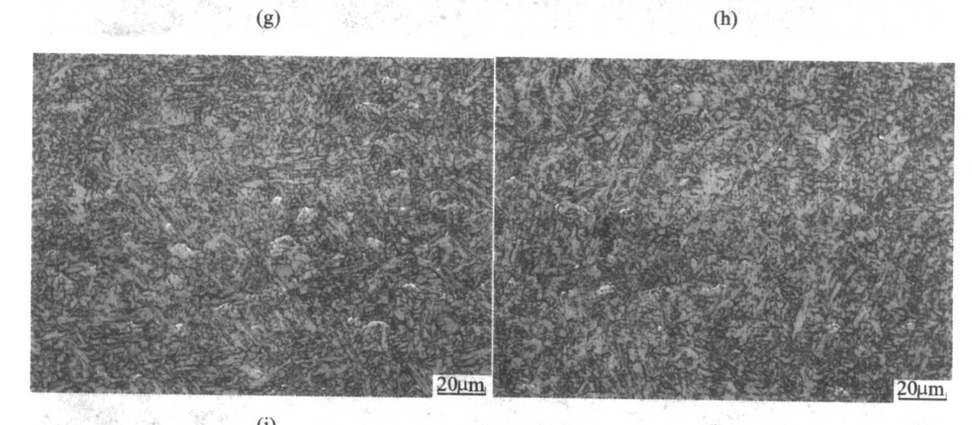
图 4.3-87　焊缝金属典型光学金相组织

20μm 20μm

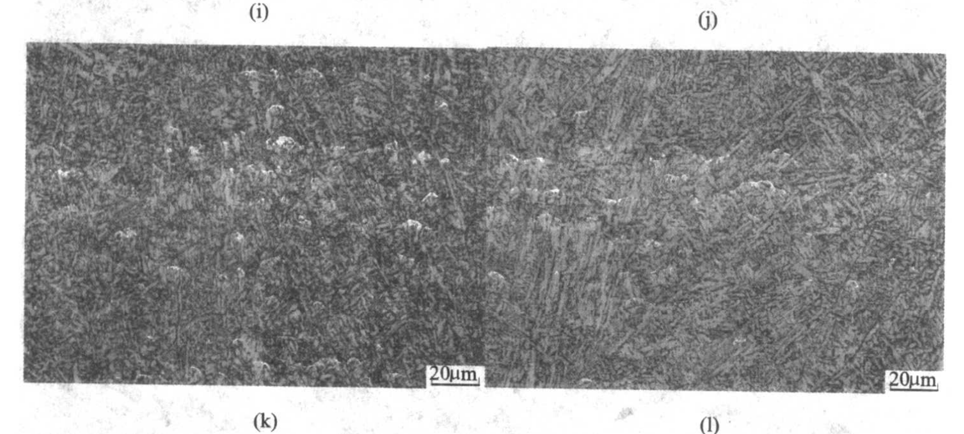
(e) (f)



(g) (h)



(i) (j)



(k) (l)

续图 4.3-87

表 4.3-46 接头焊缝金属的拉伸及弯曲试验结果

$\sigma_{p0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%	背弯（$d=3a$）
690	810	20.5	69	180°合格

表 4.3-47 接头各部位的冲击试验结果

试验温度 / 缺口部位	0℃ 冲击功（试样值/平均值）/J	-20℃ 冲击功（试样值/平均值）/J	-40℃ 冲击功（试样值/平均值）/J
焊缝	178 182 / 180	155 151 152 / 153	125 130 61（缺陷）/ 128
熔合线	120 151 / 135	74 50 89 / 71	83 63 153 / 100
热影响区	127 162 / 145	69 87 57 / 71	36 47 40 / 41

4.4 RPC 超细组织低合金钢的激光焊接研究

激光焊接由于其极快的加热和冷却速度以及很小的热作用范围，使得激光焊接具有常规焊接方法不同的特点，例如晶粒长大倾向比普通焊接方法要小，热影响区更窄，但同时也带来了更加不平衡的组织转变。为此，对 800 MPa RPC 超细组织低合金钢的激光焊接性进行了研究，得到了不同激光焊接条件下焊缝和热影响区（HAZ）的晶粒长大倾向、组织特征及低温冲击韧性等的变化规律。

4.4.1 研究方法

（1）实验材料与设备

在激光焊接和热模拟实验中选用了 800 MPaRPC 超细组织低合金钢，其化学成分如表 4.3-48 所示。焊接实验中采用了 12 mm 和 3 mm 两种厚度的钢板进行激光深熔焊，所有工件焊前都经过加工去锈并用丙酮清洗。热模拟实验时采用的试件尺寸是 10 mm × 10 mm × 55 mm 和 70 mm × 10 mm × 2.5 mm。

表 4.3-48　800 MPa RPC 超细晶粒钢的成分（质量分数）　%

C	Si	Mn	S	P	Ni	Mo	Cu	Nb	Ti	B
0.04	0.33	1.59	0.005	0.008	0.26	0.25	0.29	0.053	0.03	0.000 8

激光焊接实验是利用 3 kW 快速轴流 CO_2 激光器进行的。该激光器可以脉冲和连续方式输出 TEM00 + TEM01 * 模式的激光束，采用焦距为 190 mm 的 ZnSe 透镜进行聚焦，焊接过程中采用 Ar 作为保护气体。

热模拟实验是利用 Gleeble - 1500D 热 - 力学模拟试验机完成的，热模拟过程中使用的保护气体为 Ar。

（2）实验与分析方法

1）激光焊接　在焊接性实验中分别采用了如下五种焊接规范：

规范 1：$P = 2\,400$ W，$v = 1.2$ m/min，线能量为 120 J/mm
规范 2：$P = 2\,400$ W，$v = 0.8$ m/min，线能量为 180 J/mm
规范 3：$P = 2\,400$ W，$v = 0.6$ m/min，线能量为 240 J/mm
规范 4：$P = 2\,400$ W，$v = 0.48$ m/min，线能量为 300 J/mm
规范 5：$P = 2\,400$ W，$v = 0.24$ m/min，线能量为 600 J/mm

2）热模拟　热模拟试验中设定最高温度为 1 320 ℃，升温时间为 1.0 s，$t_{8/5}$ 分别为 < 1 s，4.5 s，8 s，15 s，30 s。图 4.3-88 所示是实测的热循环曲线。

(a) $t_{8/5}$<1s

(b) $t_{8/5}$=4.5s

(c) $t_{8/5}$=8s

(d) $t_{8/5}$=15s

(e) $t_{8/5}$=30s

图 4.3-88　不同 $t_{8/5}$ 热模拟实验的热循环曲线



3）分析方法 焊接和热模拟实验后，利用光学显微镜和JEM－200CX型透射电镜观察焊缝、HAZ及热模拟试样的微观组织，采用HX200显微硬度仪测量其显微硬度。

冲击试验采用两种试验方法，对3 mm薄板进行－40℃艾氏冲击试验，冲击试样尺寸为70 mm×10 mm×2.5 mm；对10 mm厚板进行－40℃低温夏比缺口冲击，试样尺寸10 mm×10 mm×55 mm。冲击后用JSM－6301F型扫描电镜观察冲击断口形貌。

4.4.2 实验结果和分析

（1）800 MPa RPC低合金钢焊缝和HAZ晶粒长大规律

表4.3-49和表4.3-50分别是激光焊接接头和热模拟试样的晶粒尺寸。可以看出，在120～600 J/mm线能量的激光焊接条件下，焊缝和HAZ晶粒尺寸都是随线能量的增加而增大，焊缝最大柱状晶尺寸为55 μm，HAZ粗晶区最大晶粒直径约50 μm，热模拟试样的最大晶粒尺寸为65 μm。这些晶粒均略小于同等实验条件下400 MPa级超细晶粒碳素钢的晶粒尺寸，这与RPC超细组织低合金钢中含有Nb、Ti等抑止晶粒长大的合金元素有关。尽管如此，与母材相比，焊缝和热影响区晶粒还是长大了至少8～10倍，这种粗大的晶粒必然对焊缝和热影响区的韧性产生一定影响。因此，从控制晶粒长大的角度考虑，应当选择较小的线能量。

表4.3-49 800 MPa RPC超细组织钢激光焊接接头各区域晶粒尺寸

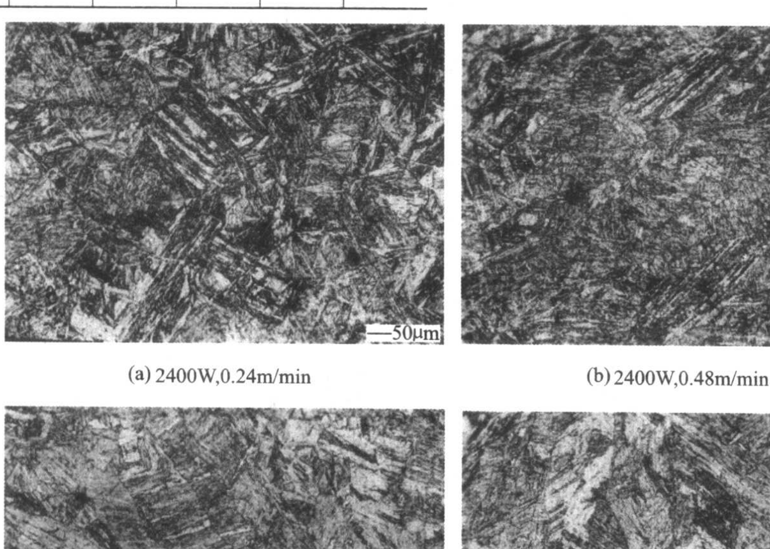
板厚/mm	焊接线能量 J/mm	600	300	240	180	120
12	焊缝晶粒尺寸/μm	55	45		40	35
	粗晶区晶粒尺寸/μm	50	45		35	30
3	焊缝晶粒尺寸/μm		45	40	35	27.5
	粗晶区晶粒尺寸/μm		42.5	35	30	25

表4.3-50 800 MPa RPC超超细组织钢热模拟试样晶粒尺寸

$t_{8/5}$/s	<1	4.5	8	15	30
晶粒尺寸/μm	35	40	45	55	65

（2）800 MPa RPC低合金钢焊缝和HAZ组织

1）焊缝组织 图4.3-89给出了几种激光焊接条件下的焊缝和热影响区组织的光镜照片。可以看出，2400 W，0.24 m/min（线能量600 J/mm）时焊缝的主要组织为马氏体，还有一定数量的铁素体存在（图4.3-89a）。由图4.3-89b可知，2 400 W，0.48 m/min（线能量为300 J/mm）时焊缝的主要组织为马氏体，但含有少量铁素体。图4.3-89c和图4.3-89d表明，2 400 W，0.8 m/min（线能量180 J/mm）和2 400 W，1.2 m/min（线能量120 J/mm）条件下焊缝的组织均为单一的马氏体，只是120 J/mm的马氏体板条尺寸更细小。



(a) 2400W,0.24m/min (b) 2400W,0.48m/min
(c) 2400W,0.8m/min (d) 2400W,1.2m/min

图4.3-89 RPC超细组织低合金钢激光焊缝金相组织

图4.3-90给出了各焊缝中马氏体和铁素体的透射电镜照片。可以看出在2 400 W、0.24 m/min规范下，焊缝区的铁素体为块状。而在2 400 W、0.48 m/min规范下，焊缝组织中的铁素体形态由大块变为针状。在2 400 W、0.8 m/min和2400 W、1.2 m/min两种规范下，焊缝区只有马氏体存在。

2）HAZ组织 图4.3-91给出了几种激光焊接条件下的焊缝和热影响区组织的光镜照片。可以看出，HAZ粗晶区的组织主要是马氏体和贝氏体。



马氏体 铁素体

(a) 2400W，0.24m/min焊缝组织TEM照片

马氏体 针状铁素体

(b) 2400W，0.48m/min焊缝组织TEM照片

马氏体

(c) 2400W，0.8m/min焊缝组织TEM照片

马氏体

(d) 2400W，1.2m/min焊缝组织TEM照片

图 4.3-90 RPC 超细组织低合金钢激光焊缝组织透镜照片

(a) 2400W,0.24m/min (25μm)

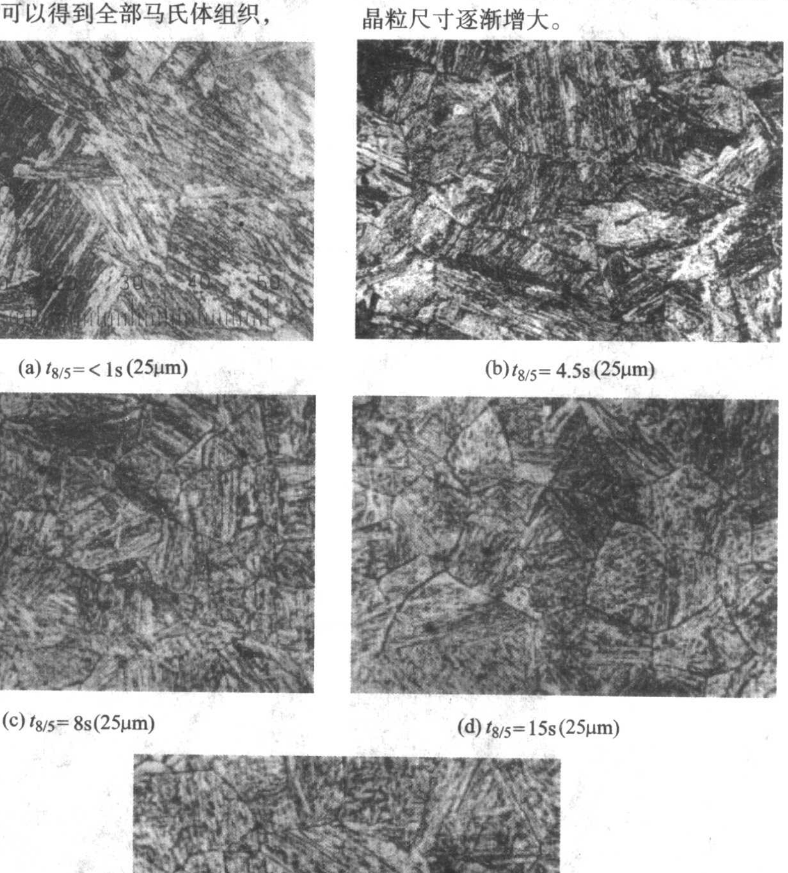
(b) 2400W,0.48m/min (25μm)

(c) 2400W,0.8m/min (25μm)

(d) 2400W,1.2m/min (25μm)

图 4.3-91 RPC 超细组织低合金钢激光焊 HAZ 组织

为进一步了解 HAZ 的精细组织，对各种规范下的热模拟试样均进行了光镜和透射电镜的观察。图 4.3-92 所示即为不同 $t_{8/5}$ 条件下热模拟试样组织的光镜照片。可以看出，在 $t_{8/5}<1$ s 以及 $t_{8/5}=4.5$ s 时可以得到全部马氏体组织，当然 $t_{8/5}\leqslant 1$ s 时所得到的平均晶粒及马氏体板条束更为细小（图 4.3-92a 和 b）；图 4.3-92c ~ e 则显示出 $t_{8/5}$ 为 8 s，15 s 和 30 s 时得到马氏体和贝氏体的混合组织，而且随 $t_{8/5}$ 的增加，晶粒尺寸逐渐增大。



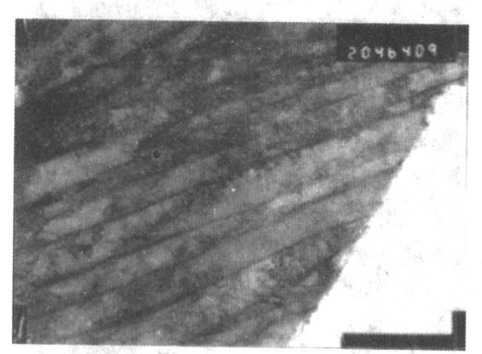
(a) $t_{8/5}=<1$s (25μm)　(b) $t_{8/5}=4.5$s (25μm)

(c) $t_{8/5}=8$s (25μm)　(d) $t_{8/5}=15$s (25μm)

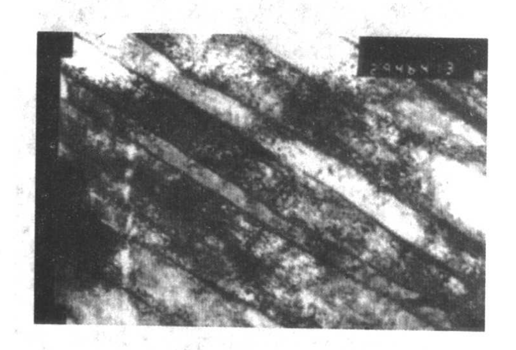
(e) $t_{8/5}=30$s (25μm)

图 4.3-92　热模拟条件下的金相组织（光镜）

图 4.3-93 为各 $t_{8/5}$ 条件下热模拟试样典型组织的 TEM 照片。可以明显看出在 $t_{8/5}<1$ s 以及 $t_{8/5}=4.5$ s 时可以得到全部马氏体组织，当然 $t_{8/5}\leqslant 1$ s 时所得到的平均晶粒及马氏体板条束更为细小（图 4.3-93a ~ d）。图 4.3-93e ~ j 则显示出 $t_{8/5}$ 为 8 s，15 s 和 30 s 时得到马氏体和上贝氏体的混合组织，而且随 $t_{8/5}$ 的增加，上贝氏体含量逐渐增多。值得注意的是，在所有热模拟试样中均没有发现下贝氏体存在。



(a) $t_{8/5}<1$s 马氏体 (1μm)



(b) $t_{8/5}<1$s 马氏体 (1μm)

图 4.3-93　热模拟试样组织 TEM 照片



(c) $t_{8/5}$<4.5s 马氏体 (1μm)

(d) $t_{8/5}$<4.5s 马氏体 (1μm)

(e) $t_{8/5}$<8s 马氏体 (1μm)

(f) $t_{8/5}$<8s 上贝氏体 (1μm)

(g) $t_{8/5}$<15s 马氏体 (1μm)

(h) $t_{8/5}$<15s 上贝氏体 (1μm)

(i) $t_{8/5}$<30s 马氏体 (1μm)

(j) $t_{8/5}$<30s 上贝氏体 (0.8μm)

续图 4.3-93

从以上的实验结果可以看出，RPC 超细组织低合金钢经焊接热循环作用，焊缝和 HAZ 形成了以马氏体为主的组织：线能量小于 240 J/mm 时焊缝和 HAZ 粗晶区可得到全部马氏体组织，线能量超过 300 J/mm 时焊缝中会出现少量针状铁素体或者块状铁素体，而 HAZ 粗晶区则出现上贝氏体。热模拟实验结果表明，在 $t_{8/5} < 5$ s 时可得到全部马氏体，当 $t_{8/5} > 8$ s 时出现马氏体和上贝氏体的混合组织，且上贝氏体含量随 $t_{8/5}$ 增加而增加。由于上贝氏体是一种韧性很差的组织，可以预测，出现上贝氏体组织的热模拟试样的冲击韧性较低。

(3) 800 MPa RPC 低合金钢焊缝和 HAZ 力学性能

1) 接头等强性问题　在一般焊接条件下，RPC 超细组织钢是否易出现较为严重的热影响区软化现象是人们担心的，因为经 RPC 处理得到的母材在经历再结晶温度至 A_{c1} 和 $A_{c1}-A_{c3}$ 两个温度区间时，容易出现软化现象。在前一个温度区间可能会出现因形变强化的组织再结晶而产生的软化，而后一个温度区间因碳化物溶解不充分，使得奥氏体的成分显著低于平衡浓度，冷却时这种未饱和的奥氏体高温分解而具有较低的强度。但对激光焊接而言，焊接热影响区容易产生硬度较高的组织，并且由于其快速的加热和冷却速度使金属在易出现软化的温度区间停留时间极短，以及激光焊接很窄的热影响区范围，因此激光焊接接头软化现象并不是主要问题。这一点可以由下面的实验结果得以证实。

图 4.3-94 为四种焊接工艺参数下的 12 mm RPC 超细组织低合金钢激光焊接接头硬度分布。可以看出焊缝金属的平均硬度在 310～320 HV 之间，热影响区的最高硬度在 345 HV 左右，但在四种焊接规范下均没有出现明显的软化区。

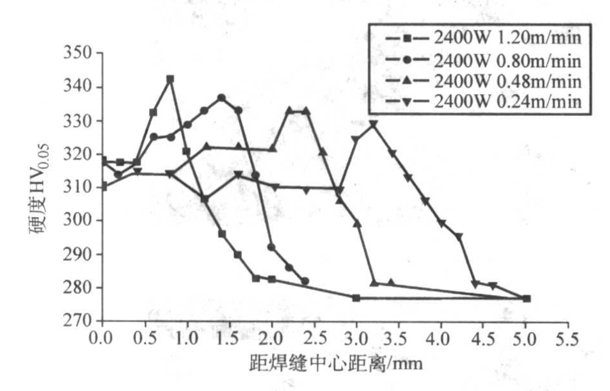


图 4.3-94　12 mm 厚板激光焊接接头各区域的显微硬度曲线

图 4.3-95 为四种焊接工艺参数下的 3 mm RPC 超细组织低合金钢激光焊接接头硬度分布。可以看出，在焊接速度 0.48 m/min 到 1.2 m/min 变化范围内，焊缝金属的平均硬度在 300～330 HV 之间，热影响区的最高硬度在 350 HV 左右，而且随着线能量的增大，焊缝区域的硬度和热影响区的最高硬度是逐步减小的。这是因为线能量输入的增大会减少焊缝及热影响区淬硬组织（主要是马氏体）的比例。另外，可从图中看出，母材的平均硬度为 275 HV，说明焊缝和 HAZ 均高于母材，焊接接头并没有出现软化区，也没有由于激光

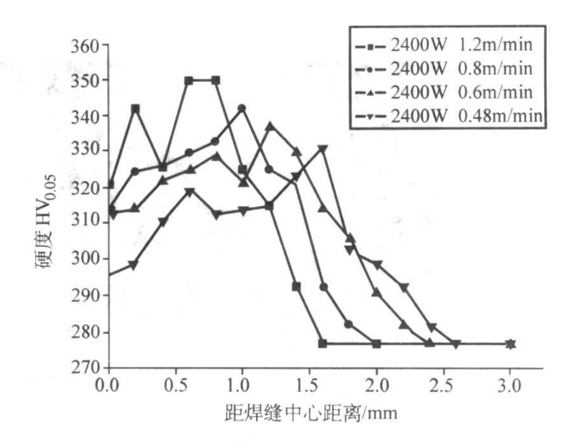


图 4.3-95　3 mm 厚板激光焊接接头各区域的显微硬度曲线

焊接作用导致的接头过于硬化的现象出现。因此可以说，对激光焊接 RPC 超细组织钢不必担心接头的失强问题。

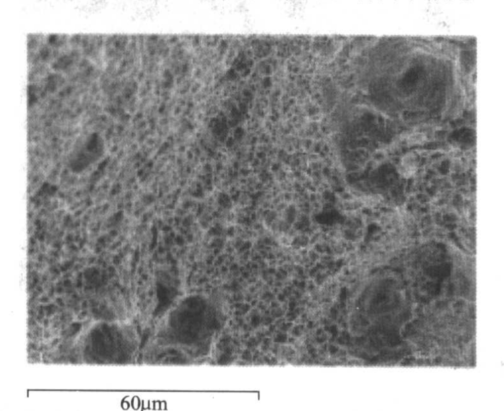
2) 接头韧性

① 焊缝　表 4.3-51 是 2.5 mm 厚板热模拟试样的艾氏冲击试验结果。可以看出母材的冲击功为 22 J，而焊缝冲击功则略高于母材，其中线能量范围在 180～300 J/mm 时焊缝冲击功为 25 J，线能量为 120 J/mm 时为 27 J。这主要是由于焊缝组织为低碳马氏体为主，含少量针状铁素体，母材虽然是贝氏体组织，但其中含有韧性很差的上贝氏体组织。

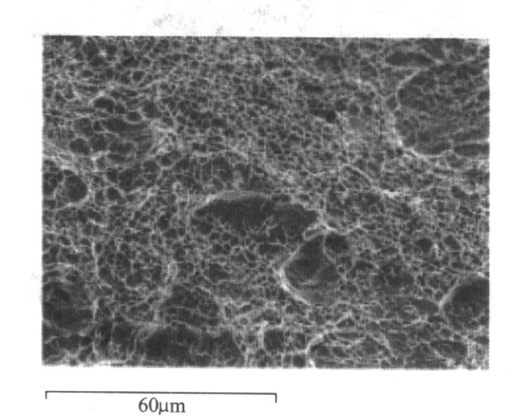
表 4.3-51　3 mm 薄板焊接试件 -40℃ 的艾氏冲击结果（冲击试样厚 2.5 mm）

试样编号	试样规范	试验温度/℃	冲击吸收功/J
1	2 400 W，1.2 m/s	-40	27
2	2 400 W，0.8 m/s	-40	25
3	2 400 W，0.6 m/s	-40	25
4	2 400 W，0.48 m/s	-40	25
5	母材	-40	22

图 4.3-96 所示是不同焊接条件下艾氏冲击断口形貌的 SEM 照片。可以看出无论是焊缝还是母材，其断口形貌几乎全部是韧窝状的韧性断口，只有在焊接速度为 0.48 m/min 时出现了少量局部的解理形貌，这可能是和组织中含铁素体有关。



(a) 断裂韧窝(近缺口)，v=1.2m/s



(b) 断裂韧窝(断口中部)，v=1.2m/s

图 4.3-96　3 mm 薄板焊接冲击断口扫描电镜照片

60μm

(c) 断裂韧窝(近缺口), v=0.8m/s

60μm

(d) 断裂韧窝(断口中部), v=0.8m/s

60μm

(e) 断裂韧窝(近缺口), v=0.6m/s

60μm

(f) 断裂韧窝(断口中部), v=0.6m/s

60μm

(g) 断裂韧窝(近缺口), v=0.48m/s

60μm

(h) 韧窝 + 解理(断口中部), v=0.48m/s

60μm

(i) 冲击断裂韧窝(近缺口), 母材

60μm

(j) 韧窝(断口中部), 母材

续图 4.3-96

② 热模拟试样　表 4.3-52 是 2.5 mm 厚热模拟试样的艾氏冲击试验结果。可以看出，$t_{8/5}$ 为 5 s，8 s 和 30 s 时的冲击功均约为 23 J，与母材相当，而 $t_{8/5}$ 为 2 s 时的冲击功仅为 18 J，低于母材。



表 4.3-52 RPC 超细晶粒钢热模拟试件 -40℃的艾氏冲击结果

试样编号	试样规范	试验温度/℃	冲击吸收功/J
1	$t_{8/5}=2.0$ s	-40	18
2	$t_{8/5}=5.0$ s	-40	23
3	$t_{8/5}=8.0$ s	-40	23
4	$t_{8/5}=30.0$ s	-40	24
5	母材	-40	22

综合以上艾氏冲击结果并结合热模拟试样的微观组织可以发现，过慢的冷速会导致上贝氏体组织生成，对韧性不利；过快的冷速则会产生硬度过高的马氏体，同样使韧性下降；只有在合适的 $t_{8/5}$（4.6~5 s）条件下使组织刚好全部是马氏体（上贝氏体完全消失）时冲击韧性具有最高值。

5 船舶用低合金高强钢的焊接

受20世纪70年代中期和80年代中期二次严重造船危机的打击，世界造船业总局面发生了重要变化。日本、韩国、中国（包括台湾省）造船业迅速发展起来，使世界造船中心由欧洲转向东亚，东亚地区的造船量占世界造船总量的78%（以总吨计），在东亚地区造船诸国中又形成了日本、韩国、中国大连和上海的世界造船"金三角"地区。

与普碳钢相比，高强钢制作商用船具有以下优点：①钢材使用量减少；②板厚减少使得焊接工作量降低；③承载能力提高；④安定性提高；⑤单位质量的钢材价格高；⑥为防止焊接裂纹的产生，必须采用预热等施工方法；⑦从保证船体疲劳寿命角度出发，设计上和施工上要对缺口严格控制；⑧由于预留腐蚀层厚度和软钢基本相同，使得小型船只（板厚较小）即使采用高强钢也不能有效降低板厚等不利因素。

1971年，国际上统一规定了屈服点为320 MPa和360 MPa级钢的规范。造船大国日本1973年48万吨级油轮建造成功，在船侧钢板、上甲板、船底板、纵向贯通隔板及纵向贯通筋板等部位广泛使用了高强钢。然而，高强钢焊接裂纹敏感性高，焊接施工效率低，使得即使使用高强钢并不绝对意味着建造成本的降低，因此，在相当长的时期内高强钢在造船业的应用推广受限，同样原因，屈服点360 MPa级钢的使用增长量未能达到320 MPa级钢水平。

船体上大规模地使用高强钢是在TMCP钢实用化的1980年以后。由于TMCP钢Ceq、Pcm低，焊接裂纹敏感性得到相当程度改善，解决了焊接施工效率低下的问题，使得高强钢的使用率得到很大程度的提高。TMCP技术的成功应用，不仅抑制了焊接裂纹产生，而且大大改善了高热输入焊接热影响区的韧性，使得高热输入焊接（或称高效焊接）技术在造船业广泛推广。

在我国，造船生产中应用的高效焊接工艺方法，从20世纪70年代末期的3~5种发展到现在的35种，基本满足了建造出口船舶、海洋石油平台以及各类非船舶产品的需要。一些重点骨干船厂先后都引进了国外先进的平面分段装焊流水线，采用了拼板工位多丝埋弧自动单面焊双面成形新工艺、新设备。其焊接范围可用于5~35 mm的船用板材对接拼板，同时在按区域造船的理论指导下，对船体的平面分段构架装焊也采用了半自动或自动气体保护角焊工艺，使焊接效率大大提高。同时在焊接材料应用方面，药芯焊丝的应用量异军突起，因为药芯焊丝有其独特的优点，熔敷效率高，焊缝质量好，焊接飞溅少，容易实现机械化、自动化焊接。目前船厂已普遍采用药芯焊丝来焊接船舶结构，同时又与CO_2焊接工艺技术相结合，使船厂在焊接生产中尝到了甜头，所以目前一些船厂认为CO_2气体保护药芯焊丝焊接将作为船厂的主要焊接工艺与焊接材料。CO_2气体保护药芯焊丝的应用每年都明显增长，如表4.3-53所示。

表 4.3-53 CO_2 气体保护药芯焊丝的应用比例 %

年份	1996	1997	1998	1999	2000	2001
总的焊接高效化率	72.35	74	72.35	72.16	76.8	80.89
CO_2气体保护焊应用率	41.89	47.66	50.52	53.1	60.52	65.03

同时绝大部分船厂近年来又普遍采用了气电垂直自动焊技术，结束了依赖进口的局面。该焊接工艺的应用使船厂在承接出口定单时增添了一份信心，其焊接质量基本上能达到100%合格。这也是我们船舶焊接技术中有显著特点的技术与设备。另外在一些高附加值船的建造与非船产品（如大型钢结构、高层建筑、大型桥梁等）上也开创了许多新的焊接技术，取得了较大的经济效益和社会效益。

编写：田志凌（钢铁研究总院）



第 4 章　耐热钢的焊接

1　概述

1.1　耐热钢的种类

碳素结构钢的强度性能随着工作温度的提高而急剧下降，其极限的工作温度为 350℃。在更高的温度下必须在钢中加入一定量的合金元素以提高钢的高温强度和持久强度。

耐热钢按其合金成分的质量分数可分低合金、中合金和高合金耐热钢。合金元素总质量分数在 5%下的合金钢通称为低合金耐热钢，其合金系列有 Mo、Cr-Mo、Mo-V、Cr-Mo-V、Cr-Mo-V-Nb、Mn-Mo-V、Mn-Ni-Mo 和 Cr-Mo-W-V-Ti-B 等。对焊接结构用低合金耐热钢，为改善其焊接性，碳的质量分数均控制在 0.2%以下，某些合金成分较高的低合金耐热钢，标准规定其碳的质量分数不高于 0.15%。

这些低合金耐热钢通常以退火状态或正火状态 + 回火状态供货。合金总质量分数在 2.5%以下的低合金耐热钢在供货状态下具有珠光体 + 铁素体组织。故也称珠光体耐热钢。合金总质量分数在 3% ~ 5%的低合金耐热钢，在供货状态下具有贝氏体 + 铁素体组织，亦称其为贝氏体耐热钢。

合金总质量分数在 6% ~ 12%的合金钢系列称为中合金耐热钢。目前，用于焊接结构的中合金耐热钢的合金系列有：Cr-Mo、Cr-Mo-V、Cr-Mo-Nb、Cr-Mo-V-Nb、Cr-Mo-W-V-Nb 等。这些中合金钢必须以退火状态或正火 + 回火状态供货，某些钢也可以调质状态供货。合金总质量分数在 10%以下的耐热钢，在退火状态下具有铁素体 + 合金碳化物的组织。在正火 + 回火状态下，这些合金钢的组织为铁素体 + 贝氏体。当钢的合金总质量分数超过 10%时，其供货状态下的组织为马氏体，属于马氏体耐热钢。

合金总质量分数高于 13%的合金钢称为高合金耐热钢。按其供货状态下的组织可分为马氏体、铁素体和奥氏体三种。应用最广泛的高合金耐热钢为铬镍奥氏体耐热钢，其合金系列为：Cr-Ni、Cr-Ni-Ti、Cr-Ni-Mo、Cr-Ni-Nb、Cr-Ni-Mo-Nb、Cr-Ni-Mo-V-Nb 及 Cr-Ni-Si 等。

1.2　耐热钢的应用范围

在常规热电站、核动力装置、石油精炼设备、加氢裂化装置、合成化工容器、宇航器械以及其他高温加工设备中，耐热钢的应用相当普遍。正确的选用耐热钢种对于保证高温高压设备长期工作的可靠性和经济性具有头等重要的意义，为此应综合考虑下列因素。

① 常温和高温短时强度。
② 高温持久强度和蠕变极限。
③ 耐蚀性抗氢蚀能力和抗氧化性。
④ 抗脆断能力。
⑤ 可加工性，包括冷、热成形性能、热切割性和焊接性。
⑥ 成本。

在要求抗氧化和高温强度的运行条件下，各种典型耐热钢的极限工作温度示于图 4.4-1。在高压氢介质中，各种 Cr-Mo 钢的适用温度范围见图 4.4-2。

在不同的运行条件下，各种耐热钢容许最高工作温度列于表 4.4-1。

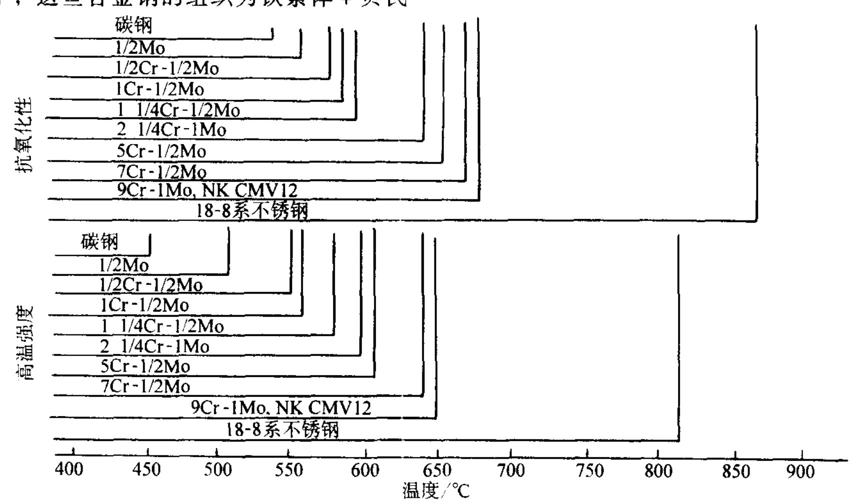


图 4.4-1　各种耐热钢的极限工作温度

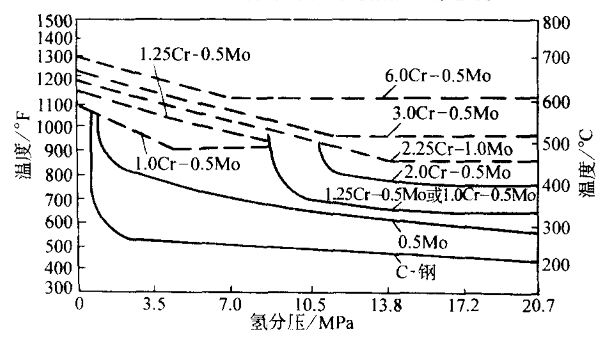


图 4.4-2　在高压氢介质中，各种 Cr-Mo 钢的适用温度范围

表 4.4-1 不同的运行条件下各种耐热钢容许最高工作温度

运行条件 \ 钢种	最高工作温度/℃						
	0.5Mo	1.25Cr-0.5Mo 1Cr-0.5Mo	2.25Cr-1Mo 1CrMoV	2CrMoWVTi 5Cr-0.5Mo	9Cr-1Mo 9CrMoV 9CrMoWVNb	12Cr-MoV	18-8CrNi（Nb）
高温高压蒸气	500	550	570	600	620	680	760
常规炼油工艺	450	530	560	600	650	—	750
合成化工工艺	410	520	560	600	650	—	800
高压加氢裂化	300	340	400	550	—	—	750

1.3 对耐热钢焊接接头性能的基本要求

对耐热钢焊接接头性能的基本要求取决于设备的运行条件、制造工艺过程和焊接结构的复杂性。为保证耐热钢焊接结构在高温、高压和各种复杂介质下长期安全的运行，焊接接头的性能必须相应满足以下几点要求。

1）接头的等强度和等塑性 耐热钢焊接接头不仅应具有与母材基本相等的室温和高温短时强度，而且更重要的应具有与母材相当的高温持久强度。

耐热钢制焊接部件大多需经冷作、热冲压成形以及弯曲等加工，焊接接头也将经受较大的塑性变形，因而应具有与母材相近的塑性变形能力。

2）接头的抗氢性和抗氧化性 耐热钢焊接接头应具有与母材基本相同的抗氢性和抗高温氧化性。为此，焊缝金属的合金成分质量分数应与母材基本相等。

3）接头的组织稳定性 耐热钢焊接接头在制造过程中，特别是厚壁接头将经受长时间多次热处理，在运行过程中则处于长期的高温、高压作用下，为确保接头性能稳定，接头各区的组织不应产生明显的变化及由此引起的脆变或软化。

4）接头的抗脆断性 虽然耐热钢焊接结构均在高温下工作，但对于压力容器和管道，其最终的检验通常是在常温下以工作压力1.5倍的压力作液压试验或气压试验。高温受压设备准备投运或检修后，都要经历冷启动过程。因此，耐热钢焊接接头应具有一定的抗脆断性。

5）低合金耐热钢接头的物理均一性 低合金耐热钢焊接接头应具有与母材基本相同的物理性能，接头材料的热膨胀系数和导热率直接决定了接头在高温运行过程中的热应力，而过高的热应力对接头的提前失效将产生不利影响。

2 低合金耐热钢的焊接

2.1 低合金耐热钢的化学成分、力学性能和热处理状态

目前，在动力工程、石油化工和其他工业部门应用的低合金耐热钢已有20余种。其中最常用的是Cr-Mo、Mn-Mo型耐热钢和Cr-Mo基多元合金耐热钢，如原苏联钢种12X2MΦCP和我国自行研制的12Cr2MoWVTiB等。

在普通碳钢中加入各种合金元素，可提高钢的高温强度，其中以Mo、V、Ti等元素最明显，如图4.4-3所示。但当合金元素单独加入钢中时，这种低合金钢在高温长时作用下仍会发生组织不稳定现象，而降低高温蠕变极限。例如0.5Mo钢在450℃以上温度长期运行时就会发生石墨化，即钢中的碳化物以石墨形式分解而析出游离炭，从而使钢的高温强度和韧度降低。

在钢中同时加入其他合金元素，可明显提高钢的组织稳定性，如在钼钢中加入1.0%以上的铬、铌、钨和硼等碳化物形成元素，可进一步提高钢的蠕变极限和钢的组织稳定性。

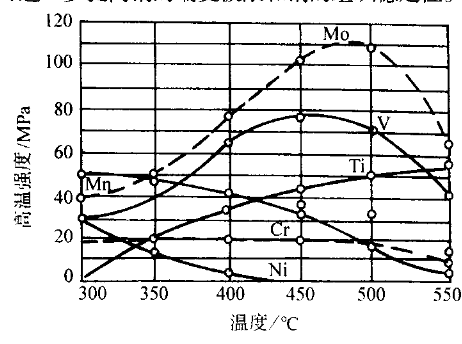


图 4.4-3 各种合金元素对钢的高温强度的影响

表4.4-2列出我国已列入国标的10余种低合金耐热钢的化学成分，标准规定的力学性能列于表4.4-3。

这里应强调指出，合金总质量分数接近或超过3%的低合金耐热钢具有空淬倾向，钢的力学性能在很大程度上取决于钢的热处理状态。对于压力容器和管道来说设计规定的许用应力值均以钢在完全热处理状态下的强度指标为基础。在焊件的制造过程中，上临界点以上温度的热加工工艺，如热卷、热冲压、锻造以及加工后的热处理必将使材料产生组织变化，从而改变钢在原始状态下的强度和韧度。因此必须注意在焊接结构的最终热处理状态下，钢材和接头的性能与原始热处理状态相应性能的差别。

在国产低合金耐热钢中，除了厚度不大于30 mm的Mo和Mn-Mo钢可以在热轧状态供货和直接使用外，其余各种耐热钢在任何厚度下均应以热处理状态供货。这些热处理状态包括：退火、完全退火、等温退火、正火、正火+回火、淬火+回火、高温回火和消除应力处理。对于耐热钢铸件还要求作均匀化处理。

各种低合金耐热钢标准规定的热处理要求及典型热处理工艺参数列于表4.4-4。

表 4.4-2 常用低合金耐热钢标准化学成分（摘自GB 5310—1995，GB 6654—1996）

钢种类型	钢号		标准化学成分（质量分数）/%									
	国标	ASTM或（DIN）	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni	V	其他
0.3Mo	15Mo	A335-P1（15Mo3）	0.12～0.20	0.17～0.37	0.40～0.80	≤0.030	≤0.030	0.25～0.35	—	—	—	—
0.5Mo	20Mo		0.15～0.25	0.17～0.37	0.40～0.80	≤0.030	≤0.030	0.44～0.65	—	—	—	—

续表 4.4-2

钢种类型	钢号		标准化学成分（质量分数）/%									
	国标	ASTM 或（DIN）	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni	V	其他
1Cr-0.5Mo	12CrMo	A335-P2	0.08～0.15	0.17～0.37	0.40～0.70	≤0.030	≤0.030	0.40～0.55	0.4～0.7	—	—	—
	15CrMo	A335-P11 A387-P12 （13CrMo44）	0.12～0.18	0.17～0.37	0.40～0.70	≤0.030	≤0.030	0.40～0.55	0.8～1.10	—	—	—
1Cr-Mo-V	12Cr1MoV	（13CrMoV42）	0.08～0.15	0.17～0.37	0.40～0.70	≤0.030	≤0.030	0.25～0.35	0.9～1.20	—	0.15～0.30	—
2.25Cr-1Mo	12Cr2Mo	A387-22 A335-P22 （10CrMo910）	0.08～0.15	≤0.5	0.40～0.70	≤0.030	≤0.030	0.90～1.20	2.00～2.50	—	—	—
2CrMo-W-V-Ti-B	12Cr2MoWVTiB		0.08～0.15	0.45～0.75	0.45～0.65	≤0.030	≤0.030	0.50～0.65	1.60～2.10	—	0.28～0.42	W：0.30～0.55 Ti：0.08～0.18 B：0.002～0.008
3Cr-Mo-V-Si-Ti-B	12Cr3MoWSiTiB		0.09～0.15	0.60～0.90	0.50～0.80	≤0.030	≤0.030	1.00～1.20	2.5～3.00	—	0.25～0.35	Ti：0.22～0.38 B：0.005～0.011
Mn-Mo-Nb	18MnMoNb	A302-A.B	≤0.22	0.15～0.50	1.20～1.60	≤0.035	≤0.030	0.45～0.65	—	—	—	Nb：0.025～0.050
Mn-Ni-Mo-Nb	18MnNiMoNb	A533-B（13MnNiMo54）	≤0.15	0.15～0.50	1.20～1.60	≤0.035	≤0.030	0.20～0.40	0.20～0.40	0.60～1.00	—	Nb：0.005～0.020

表 4.4-3　常用低合金耐热钢的标准力学性能（摘自 GB 5310—1995，GB 6654—1996）

钢号	热处理状态	厚度/mm	力学性能				
			σ_b/MPa	σ_s/MPa	δ_5/%	A_{KV}/J	备注
15Mo	正火	2～70	450～600	≥270	≥22	≥35	横向 A_{KV}（J）≥27
20Mo	正火	2～70	≥415	≥220	≥22	≥35	
12CrMo	正火＋回火	2～70	410～560	≥205	≥21	≥35	
15CrMo	正火＋回火	2～70	440～640	≥235	≥21	≥35	
12Cr1MoV	正火＋回火 壁厚大于 40mm 淬火＋回火	2～70	470～640	≥255	≥21	≥35	
12Cr2Mo	正火＋回火	2～70	450～600	≥280	≥20	≥35	壁厚大于 16～40 mm σ_s 允许降低 10 MPa
12Cr2MoWVTiB	正火＋回火	2～70	540～735	≥345	≥18	≥35	
12Cr3MoVSiTiB	正火＋回火	2～70	610～805	≥440	≥16	≥35	
18MnMoNb	正火＋回火	30～60	590～740	≥440	≥17	≥34	
		＞60～100	570～720	≥410	≥17	≥34	
13MnNiMoNb	正火＋回火	≤100	570～720	≥390	≥18	0℃≥31	
		＞100～120		≥380	≥18		

表 4.4-4　常用低合金耐热钢的热处理工艺参数

钢号	标准规定热处理	正火或淬火温度/℃	退火温火/℃	回火温度/℃	保温时间/h
15Mo	正火	910～940	—	—	—
20Mo	正火	910～940	—	—	—
12CrMo	正火＋回火	900～930	—	670～720	周期式炉≥2 h 连续炉≥1 h
15CrMo	正火＋回火	930～960	—	680～720	同上
12Cr1MoV	正火＋回火	980～1 020	—	720～760	同上
	或淬火＋回火	950～990	—	720～760	同上
12Cr2Mo	正火＋回火	900～960	—	700～750	
12Cr2MoWVTiB	正火＋回火	1 000～1 035	—	760～790	周期式炉≥2 h 连续炉≥1 h
12Cr3MoVSiTiB	正火＋回火	1 040～1 090	—	720～770	同上
18MnMoNb	正火＋回火	930～960	600～640	650～680	
13MnNiMoNb	正火＋回火	890～950	530～600	580～590	

2.2 低合金耐热钢的焊接特点

低合金耐热钢的焊接性能具有以下特点：首先这些钢按其合金含量具有不同程度的淬硬倾向。在焊接热循环决定的冷却速度下，焊缝金属和热影响区内可能形成对冷裂敏感的显微组织；其次，耐热钢中大多数含有 Cr、Mo、V、Nb 和 Ti 等强碳化物形成元素，从而使接头的过热区具有不同程度的再热裂纹（亦称消除应力裂纹）敏感性。最后，某些耐热钢焊接接头，当有害的残余元素总含量超过容许极限时会出现回火脆性或长时脆变。

（1）淬硬性

钢的淬硬性取决于它的碳含量、合金成分及其含量。低合金耐热钢中的主要合金元素铬和钼等都能显著地提高钢的淬硬性。其作用机理是延迟了钢在冷却过程中的转变，提高了过冷奥氏体的稳定性。对于成分一定的合金钢，最高淬硬度则取决于从奥氏体相的冷却速度。图 4.4-4 示出 2.25Cr1Mo 钢连续冷却组织转变图。由图示冷却曲线可见，当自 Ac_3 点以上温度以 300℃/s 的速度冷却时，则形成全马氏体组织，最高硬度超过 HV400。

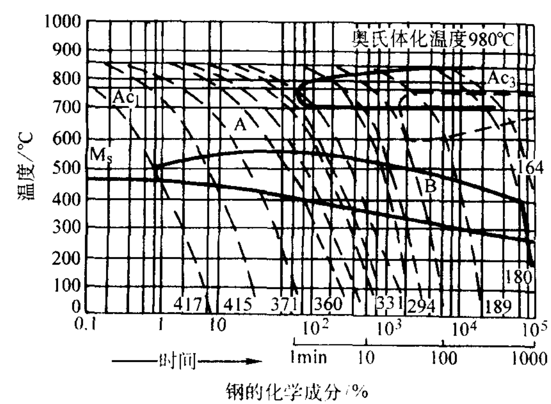
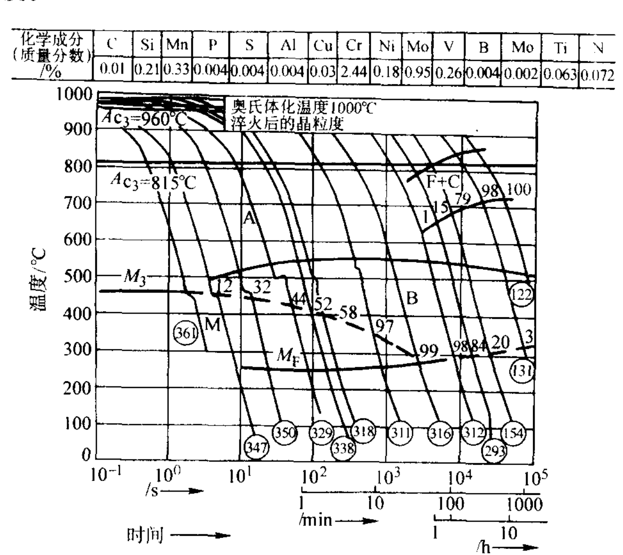


图 4.4-4 2.25Cr1Mo 钢连续冷却组织转变图

图 4.4-5 示出另一种碳含量较低的 Cr-Mo-V 型耐热钢的连续冷却组织转变图。当以相同速度冷却时，其最高淬硬度为 361Hv。可见，低的碳含量大大降低了马氏体组织的硬度。



化学成分（质量分数）/%	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Mo	V	B	Mo	Ti	N
	0.01	0.21	0.33	0.004	0.004	0.004	0.03	2.44	0.18	0.95	0.26	0.004	0.002	0.063	0.072

图 4.4-5 7CrMoVTi131 钢的连续冷却组织转变图

（2）再热裂纹倾向

低合金耐热钢焊接接头的再热裂纹（亦称消除应力裂纹）倾向主要取决于钢中碳化物形成元素的特性及其含量（见图 4.4-6）以及焊接热参数（见图 4.4-7）。通常可以 Psr 裂纹指数粗略地表征一种钢的再热裂纹敏感性。

Psr 可取钢的实际合金成分含量按下式计算：

$$Psr = w(Cr) + w(Cu) + 2w(Mo) + 10w(V)) + 7w(Nb)) + 5w(Ti)) - 2$$

如 Psr≥0，则就有可能产生再热裂纹。但在实际的结构中再热裂纹的形成还与焊接热参数、接头的拘束应力以及热处理的参数有关。对于某些再热裂纹倾向较高的耐热钢，当采用大线能量焊接方法焊接时，如多丝埋弧焊或带极埋弧堆焊，即使焊后未作消除应力热处理，在接头高拘束应力作用下会形成焊缝层间或堆焊层过热区下的再热裂纹。

为防止再热裂纹的形成，可采取下列冶金和工艺措施：

1）严格控制母材和焊材中导致再热裂纹的合金成分，应在保证钢材热强性的前提下，将 V、Ti、Nb 等合金元素的含量控制在最低的容许范围内。

2）选用高温塑性优于母材的焊接填充材料。

3）适当提高预热温度和层间温度。

4）采用低线能量焊接方法和工艺，以缩小焊接接头过热区的宽度，限制晶粒长大。

5）选择合理的热处理工艺参数，尽量缩短在敏感温度区间的保温时间。

6）合理设计接头的形式，降低接头的拘束度。

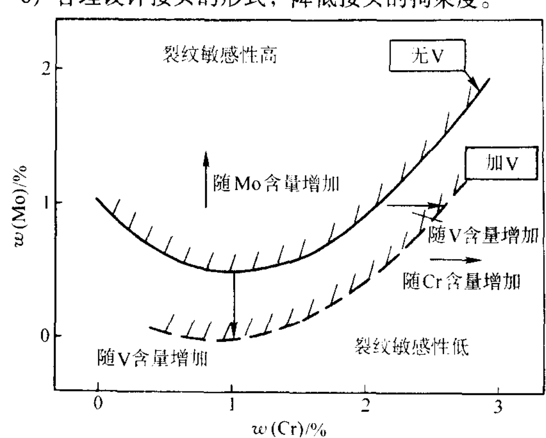


图 4.4-6 Cr、Mo、V 合金元素对钢材再热裂纹敏感性的影响

（3）回火脆性（长时脆变）

铬钼钢及其焊接接头在 370～565℃温度区间长期运行过程中发生渐进的脆变现象称为回火脆性或长时脆变。这种脆变归因于钢中的微量元素，如磷、砷、锑和锡沿晶界的扩散偏析。其综合影响可以脆性指数 $\bar{X}$ 来表征。对于焊缝金属，$\bar{X}$（10^{-6}）可按下式计算：

$$\bar{X} = (10P + 5Sb + 4Sn + As)/100$$

$\bar{X}$ 指数不应超过 20。

对于母材还应考虑 Si、Mn 等元素的影响，并引用 J（%）指数评定钢材的回火脆性。

$$J = (Mn + Si) \times (P + Sn) \times 10^4$$

如 J 指数超过 150，则说明该种钢具有明显的回火脆性。

为测定钢材对回火脆性的敏感性，通常采用分步冷却试验法。这种试验是将试件加热到规定的温度后，分段逐步冷却。温度每降一级，保温更长时间，如图 4.4-8 所示。步冷处理的目的是使钢在 200～300 h 内产生最大的回火脆性，而在等温热处理时，往往需要 2 000～5 000 h 才能产生同等程度的脆变。也就是说，步冷试验法是一种加速脆性试验法。

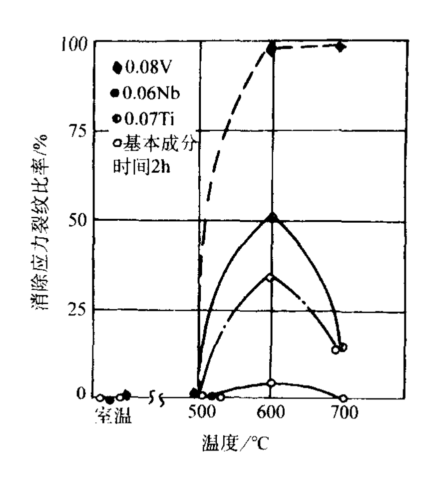


图 4.4-7 热处理温度对再热裂纹敏感性的影响

钢的基本成分质量分数：

C 0.16% Cr 0.99% Mo 0.4% Mn 0.60%

目前，对一些运行条件苛刻的 Cr-Mo 钢制厚壁容器，有关的制造技术条件规定母材和焊缝金属经步冷处理后的试样，其脆性转变温度应满足下列要求：

$$T_1 + 3(T_2 - T_1) \geqslant 10℃$$

式中，T_1 为试样在步冷处理前的 54 J 冲击功转变温度；T_2 为试样在步冷处理后的 54 J 冲击功转变温度。

为降低 Cr-Mo 钢的焊缝金属回火脆性倾向，可以采取图 4.4-9 所示的冶金和工艺措施，其中最有效的措施是降低焊缝金属中的 O、Si 和 P 的含量。

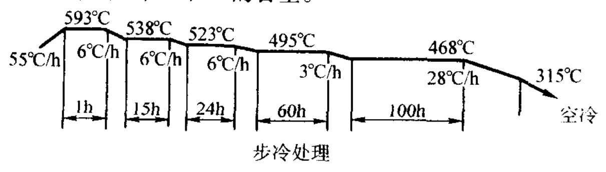


图 4.4-8 测定钢材回火脆性敏感性的步冷处理程序

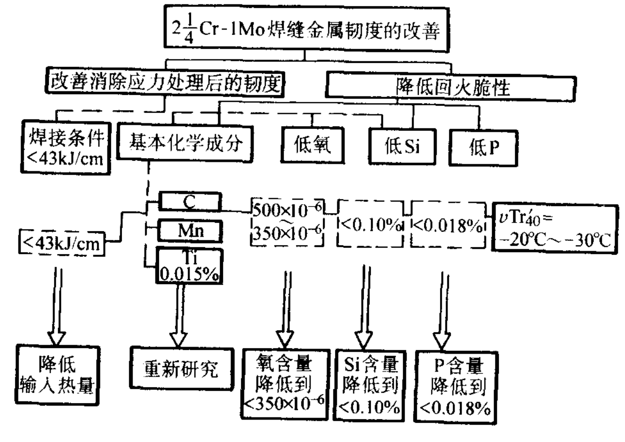


图 4.4-9 降低低合金 Cr-Mo 钢焊缝金属回火脆性的综合措施

2.3 低合金耐热钢的焊接工艺

低合金耐热钢的焊接工艺包括焊接方法的选择、焊前准备、焊接材料的选配和管理、焊前预热和焊后热处理及焊接参数的选择等。

（1）焊接方法

迄今，已在耐热钢焊接结构生产中实际应用的焊接方法有：焊条电弧焊、埋弧焊、熔化极气体保护焊、电渣焊、钨极氩弧焊、电阻焊和感应加热压力焊等。

埋弧焊由于熔敷效率高，焊缝质量好，在压力容器、管道、重型机械、钢结构、大型铸件以及汽轮机转子的焊接中都得到了广泛应用。目前，已能提供与各种耐热钢匹配的焊丝和焊剂。其中包括用于特种厚壁容器要求抗回火脆性的高纯度焊丝及烧结焊剂。

焊条电弧焊由于具有机动、灵活，能作全位置焊的特点，在低合金耐热钢结构的焊接中应用广泛。各种低合金耐热钢焊条已纳入国家标准。焊条的品种、规格和质量，除个别耐热钢种外，均已能满足工业生产的需要。为确保焊缝金属的韧度、降低裂纹倾向，低合金耐热钢的焊条电弧焊大都采用低氢型碱性焊条，但对于合金含量较低的耐热钢薄板，为改善工艺适应性，亦可采用高纤维素或高氧化钛酸性焊条。对低合金耐热钢而言，焊条电弧焊的缺点是建立低氢的焊接条件较困难，焊接工艺较复杂且效率低，焊条利用率不高，势必逐渐被低氢、高效的焊接方法（如熔化极气体保护焊）所取代。

钨极氩弧焊具有低氢、工艺适应性强、易于实现单面焊双面成形的特点，多半用于低合金耐热钢管道的封底层焊道或小直径薄壁管的焊接。这种方法的另一个优点是可采用抗回火脆性能力较强的低硅焊丝，提高焊缝金属的纯度，这对于要求高韧度的耐热钢焊接结构具有重要的意义。钨极氩弧焊的固有缺点是效率低，曾一度限制其应用范围。最近已开发成功热丝钨极氩弧焊并经受多年生产实践考验，其熔敷效率接近相同直径焊丝的熔化极气体保护焊。

熔化极气体保护焊是一种高效、优质、低成本焊接方法。目前已能提供品种规格齐全、质量符合标准要求的低合金耐热钢实心焊丝。熔化极气体保护焊，还具有较高的工艺适应性，可采用直径 0.8 mm、1.0 mm 的细焊丝实现低电流短路过渡焊接，以完成薄板接头和根部焊道。也可采用 1.2 mm 以上的粗丝实现高熔敷效率的喷射过渡焊接，以完成厚壁接头焊接。其应用范围正在不断扩大。

药心焊丝气体保护焊与普通的实心焊丝气体保护焊相比具有更高的熔敷效率，且操作性能优良、飞溅小、焊缝成形美观。某些类型的药芯焊丝还适用于管道环缝的全位置焊。由于药芯焊丝比实心焊丝更易调整焊缝金属的合金成分，接头的性能和质量能得到可靠的保证。另外，药芯焊丝比药皮焊条具有较好的抗潮性，可焊制低氢的焊缝金属。这对于低合金耐热钢厚壁焊件尤为重要。虽然药芯焊丝的市售价格高于实心焊丝，但由于焊接效率的提高使总的焊接成本反而有所降低。目前，世界各主要焊接材料生产厂商已能提供品种齐全的耐热钢药芯焊丝。因此，药芯焊丝气体保护焊在低合金耐热钢焊接结构生产中的应用必将迅速扩大。

电渣焊是一种焊接效率相当高的焊接方法。可采用单丝、多丝、熔嘴和板极，一次行程可完成 40 mm 以上厚壁部件的焊接。最大焊接厚度可达 1 000 mm 左右，已在低合金耐热钢厚壁容器的生产中得到稳定的应用。这种方法的另一优点是电渣过程中产生的大量热能对焊接熔池上面的母材起到了良好的预热作用，因此特别适用于空淬性较高的合金耐热钢。另外，电渣焊过程的热循环曲线比较平缓，焊接区的冷却速度相当缓慢，对焊缝金属中扩散氢的逸出十分有利。即使是大厚度的耐热钢接头，电渣焊后无需立即作热处理，大大简化了焊接工艺。电渣焊的缺点是焊缝金属和高温热影响区的初次晶粒十分粗大。对于一些重要的焊接结构，焊后必须作正火处理，以细化晶粒，提高接头的缺口冲击韧度。

低合金耐热钢管件和棒材也可采用电阻焊、感应压力焊以及电阻感应联焊法。这些焊接方法的优点是无需填充金属。但为获得优质接头，必须严格控制焊接工艺参数。在焊接合金含量较高的耐热钢时，必须向焊接区吹送 Ar 或 H_2 等保护气体，以保证接头的致密性。此外，局部加热往往导致铬钼钢焊缝形成低塑性的组织。因此，焊后应立即将接头作相应的热处理。这种焊后热处理一般通过在焊机上加设特殊



的加热系统来完成。

(2) 焊前准备

焊前准备的内容主要是接缝边缘的切割下料、坡口加工、热切割边缘和坡口面的清理以及焊接材料的预处理。

对于一般的低合金耐热钢焊件，可以采用各种热切割法下料。热切割或电弧气刨快速加热和冷却引起的热切割边缘母材组织的变化与焊接热影响区相似，但热收缩应力要低得多。虽然如此，厚度超过 50 mm 的铬钼钢热切割边缘硬度仍可达到 HV440 以上，如在后续加工之前，对这种高硬度热切割边缘不加处理，很可能成为工件卷制和冲压过程中的开裂源。

为防止厚板热切割边缘的开裂，应采取下列工艺措施。

1) 对于所有厚度的 2.25Cr-Mo、3Cr-1Mo 型钢和 15 mm 以上的 1.25Cr-0.5Mo 钢板热切割前应将割口边缘预热至 150℃以上。热切割边缘应作机械加工并用磁粉探伤检查是否存在表面裂纹。

2) 对于 15 mm 以下的 1.25Cr-0.5Mo 合金系以上的钢板和 15 mm 以上的 0.5Mo 钢板热切割前应预热 100℃以上。热切割边缘应作机械加工并用磁粉探伤检查是否存在表面裂纹。

3) 对于 15 mm 以下的 0.5Mo 钢板热切割前不必预热。热切割边缘最好作机械加工。热切割边缘或坡口面如直接进行焊接，焊前必须清理干净热切割焊渣和氧化皮。切割面缺口应用砂轮修磨圆滑过渡，机械加工的边缘或坡口面焊前应清除油迹等污物。对焊缝质量要求较高的焊件，焊前最好用丙酮擦坡口表面。

焊接材料在使用前应作适当的预处理。埋弧焊用光焊丝，应将表面防锈油清除干净。镀铜焊丝亦应将表面积尘和污垢仔细清除。

焊条电弧焊药皮焊条和埋弧焊焊剂除妥善保管外，在使用前，应严格按工艺规程的规定进行烘干。这对于保持焊缝金属的低氢含量至关重要。表 4.4-5 列出几种常用低合金耐热钢焊条和焊剂典型烘干制度。这里应强调指出，各种焊剂和药皮焊条的吸潮特性随制造工艺而变化。故最合理的烘干参数应根据焊条和焊剂生产厂的产品说明书来制定。

表 4.4-5　常用低合金耐热钢焊条和焊剂的烘干参数

焊条和焊剂牌号	烘干温度/℃	烘干时间/h	保持温度/℃
R102，R202，R302	150～200	1～2	50～80
R107，R207，R307，R407，R317，R347，R427	350～400	1～2	127～150
HJ350，HJ250，HJ380（熔炼焊剂）	400～450	2～3	120～150
SJ101，SJ301，SJ605（烧结焊剂）	300～350	2～3	120～150

(3) 焊接材料的选配

低合金耐热钢焊接材料的选配原则是焊缝金属的合金成分与强度性能应基本符合母材标准规定的下限值或应达到产品技术条件规定的最低性能指标。如焊件焊后需经退火、正火或热成形，则应选择合金成分和强度级别较高的焊接材料。为提高焊缝金属的抗裂性，通常将焊接材料中的碳含量控制在低于母材的碳含量。对于一些特殊用途的焊丝和焊条，例如为了免除焊后热处理所采用的焊条，其焊缝金属的碳含量控制在 0.05% 以下。AWS A5.5 中的 E8018-B2L 和 E9018-B3L 就属于这类焊条。

然而，最近的研究表明，对于 1.25Cr-0.5Mo 钢和 2.25Cr-1Mo 钢来说，焊缝金属的最佳碳含量为 0.10% 左右。在这种碳含量下焊缝金属具有最高的冲击韧度和与母材相当的高温蠕变极限。而碳含量过低的铬钼钢焊缝金属，经长时间的焊后热处理会促使铁素体的形成，导致韧度下降，故应谨慎使用碳含量过低的焊丝和焊条。

对于在我国常用的低合金耐热钢可按表 4.4-6 选配相应的焊接材料。其中包括我国现行国标的焊材标准和世界公认的 AWS 焊材标准所列的各种低合金耐热钢焊条、埋弧焊焊丝、焊剂及气体保护焊焊丝。

(4) 预热和焊后热处理

预热是防止低合金耐热钢焊接接头冷裂纹和再热裂纹的有效措施之一。预热温度主要依据钢的碳当量、接头的拘束度和焊缝金属的氢含量来决定。对于低合金耐热钢，预热温度并非愈高愈好，例如对于铬含量大于 2% 的铬钼钢为防止氢致裂纹的产生，规定较高的预热温度是必要的，但不应高于马氏体转变结束点 M_f 的温度，否则当焊件作最终焊后热处理时，会使奥氏体不发生转变。除非焊件的冷却过程加以严格控制，不然，这部分残余奥氏体就可能转变成马氏体组织，而失去了焊后热处理对马氏体组织的回火作用。这种转变过程如图 4.4-10a 所示，它的危险在于焊件冷却过程中残留的奥氏体由于塑性较好，即使吸收较多的氢也不致产生裂纹，但当奥氏体转变成马氏体组织时，少量氢的逸出就足以促使裂纹的产生。图 4.4-10b 示出另一种焊接工艺的温度参数，其预热温度和层间温度均在 M_f 点以下。焊接结束后，奥氏体立即在层间温度下转变成马氏体，并在马氏体转变完全结束后再进行焊后热处理，从而使马氏体组织得到回火处理而形成韧度较高的回火马氏体。这种焊接工艺的关键是应将焊接结束到焊后热处理的间隔时间作为重要参数列入焊接工艺规程之中。在焊接中小型焊件时，如采用电加热器预热和焊后热处理，则按图 4.4-10b 所示的焊接温度参数，焊接工艺的实施不会发生任何困难。但在大型焊件焊接中，如使用火焰预热焊件且焊后需进炉热处理，则从焊接结束到装炉这段时间内，接头产生裂纹的危险性较大。为防止焊件在焊后热处理之前产生裂纹，最简单而可靠的措施是将接头作 2～3 h的低温热处理。热处理的温度按钢种和壁厚而定。一般在 250～300℃之间。

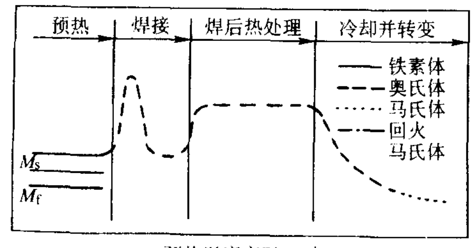
表 4.4-6　低合金耐热钢焊接材料选用表

钢号		焊条电弧焊		埋弧焊		气体保护焊	
国标	ASTM（DIN）	牌号	国标型号	牌号	型号	牌号	型号
15Mo	A204-A.B.C A209-T1 A335-P1 (15Mo3)	R102 R107	E5003-A1 E5015-A1 E7015-A1 (AWS)[①]	H08MnMoA + HJ350	F5114-H08MnMoA F7P0-EA1-A1 (AWS)	H08MnSiMo TGR50M（TIG）	ER55-D2
12CrMo	A387-2 A213-T2 A335-P2	R202 R207	E5503-B1 E5515-B1 E8015-B1 (AWS)	H10MoCrA + HJ350	F5114-H10MoCrA F9P2-EG-G (AWS)	H08CrMnSiMo	ER55-B2

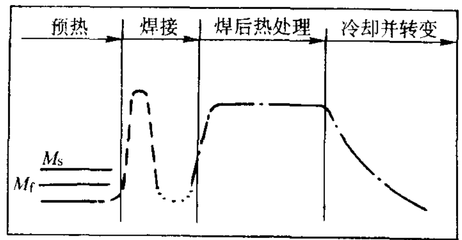
续表 4.4-6

钢号		焊条电弧焊		埋弧焊		气体保护焊	
国标	ASTM（DIN）	牌号	国标型号	牌号	型号	牌号	型号
15CrMo	A213-T12 A199-T11 A335-P11，12 A387-11，12 （13CrMo44）	R302 R307 R306Fe R307H	E5503-B2 E5515-B2 E5518-B2 F8018-B2 （AWS） E8015-B2	H08CrMoA + HJ350	F5114-H08CrMoA F9P2-EG－B2 （AWS）	H08CrMnSiMo TGR55CM（TIG）	ER55-B2
12Cr1MoV	（13CrMoV42）	R312 R316Fe R317	E5503-B-2V E5518-B-2V E5515-B-2V	H08CrMoV + HJ350	F6114-H08CrMoV	H08CrMnSiMoV TGR55V（TIG）	ER55B2MnV
12Cr2Mo	A387-22 A199-T22 A213-T22 A335-P22 （10CrMo910）	R406Fe R407	E6018-B3 E6015-B3 E9015-B3 （AWS）	H08Cr3MoMnA + HJ350 （SJ101）	F6124 + H08Cr3MnMoA F8P2-EG-B3 （AWS）	H08Cr3MoMnSi TGR59C2M	ER62-B3
12Cr2MoWVTiB	—	R347 R340	E5515-B3V-WB	H08Cr2MoWVNbB + HJ250	F6111 + H08Cr2MoWVNbB	H08Cr2MoWVNbB TGR55WB	ER62-G
18MnMoNb	A302-B，A	J707 J707Ni J607 J606	E7015-D2 E7015-G E6015-D1 E6016-D1 E9016-D1 （AWS）	H08Mn2MoA + HJ350 （SJ101） H08Mn2NiMo + HJ350 （SJ101）	F7124-H08Mn2MoA -H08Mn2NiMo F8A6-EG-A4	H08Mn2SiMoA MG59-G	ER55-D2 ER80S-D2 （AWS）
13MnNiMoNb	A302-C，D A533-A,B,C,D1 A508.2.3 （13MnNiMo54）	J607Ni J707Ni	E6015-G E7015-G E9015-G （AWS）	H08Mn2NiMo + HJ350 （SJ101）	F7124-H08Mn2NiMo F9P4-EG-G （AWS）	H08Mn2NiMoSi	ER55Ni1 ER80S-Ni1 （AWS）

① AWS-美国焊接学会。



(a) 预热温度高于 M_f 点



(b) 预热温度低于 M_f 点

图 4.4-10　焊接温度参数及相应的组织转变

大型焊件的局部预热应注意保证预热区的宽度大于所焊壁厚的 4 倍，至少不小于 150 mm，且预热区内外表面均应达到规定的预热温度。在厚壁焊件的焊接过程中，应将内外表面预热温度基本保持一致，这往往成为焊接成败的关键。对于重要的焊接结构预热温度应采用测量精度符合技术要求的表面温度计测量并作好记录。

世界各国压力容器和管道制造法规对低合金耐热钢规定的最低预热温度列于表 4.4-7。由表载数据可见，迄今只有英国标准考虑焊缝金属的氢含量高低来修正焊件的预热温度。对于厚壁容器壳体上插入式接管的环向接头，钢结构件的十字接头等高拘束度焊件，其预热温度应比表 4.4-7 所推荐的预热温度高 50℃。

表 4.4-7　各国压力容器法规规定的最低预热温度及推荐温度

钢种	推荐值		ASME		BS5000		ANSI B31.3		BS3351（低氢焊条）		BS2633（酸性焊条）	
	厚度/mm	温度/℃	厚度/mm	温度/℃	厚度/mm	温度/℃	厚度/mm	温度/℃	厚度/mm	温度/℃	厚度/mm	温度/℃
0.5Mo	≥20	80	>16	80	≥12	100	≥12	80	≥12	100	≥38	150
1Cr-0.5Mo 1.25Cr-0.5Mo	≥20	120	≥12	120	≤12 >12	100 150	所有厚度	150	≤12 >12	100 150	≤12 >12	150 200
2.25Cr1Mo 1CrMoV	≥10	150	≥12	200	≤12 >12	150 200	所有厚度	150	≤12 >12	150 200	≥12 —	200 —
2CrMoWVTiB	所有厚度	150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2Mn-Mo 2Mn-Ni-Mo	≥30	150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—



低合金耐热钢焊件可按钢和对接头性能的要求，作下列焊后处理：不作焊后热处理；580～760℃温度范围内回火或消除应力热处理；正火处理。

对于某些合金成分较低、壁厚较薄的低合金耐热钢接头，如焊前采取预热、使用低氢低碳级焊接材料且经焊接工艺试验证实接头具有足够的塑性和韧度，则焊件容许在焊后不作热处理。在遵守必要的附加条件下，各国压力容器和管道制造法规对一些常用低合金耐热钢规定了省略焊后热处理的厚度界限，如表4.4-8所示。

表4.4-8　各国制造法规对低合金耐热钢省略焊后热处理最大容许壁厚的规定　mm

钢种	HPIS①	WES②	ISO③ TC11	ASME④ Ⅷ	ASME Ⅲ	ANSI⑤ B31.3	BS⑥ 5500	BS 2633
0.5Mo	16	20	20	19	0	19	20	12.5
1Cr-0.5Mo 1.25-0.5Mo	13	16	15	19	0	13	0	12.5
2.25Cr1Mo	8	0	0	19	—	13	0	0

① 日本高压（技术）协会标准；② 日本焊接工程标准；③ 国际标准组织；④ 美国机械工程协会；⑤ 美国国家标准协会；⑥ 英国标准。

对于低合金耐热钢来说，焊后热处理的目的不仅是消除焊接残余应力，而且更重要的是改善金属组织，提高接头的综合力学性能，包括降低焊缝及热影响区的硬度，提高接头的高温蠕变极限和组织稳定性等。因此，在拟定耐热钢接头的焊后热处理工艺参数时，应综合考虑下列冶金和工艺特点。

1）焊后热处理应保证焊缝热影响区，主要是过热区组织的改善。

2）加热温度应保证接头的Ⅰ类应力降低到尽可能低的水平。

3）焊后热处理，包括多次的热处理不应使母材和焊接接头各项力学性能降低到产品技术条件规定的最低值以下。

4）焊后热处理应尽量避免在所处理钢材回火脆性敏感的或对再热裂纹敏感的温度范围内进行，并应规定在危险的温度范围内的加热和冷却速度。

表4.4-9列出各国制造法规对低合金耐热钢焊件规定的最低焊后热处理温度。从表列出的数据可见，各国法规所要求的最低热处理制度有较大差别。这与各法规所遵循的设计准则、材料标准、工艺评定准则不同有关。其次法规所列的最低热处理温度不一定是最佳热处理温度，它应根据焊件的运行条件、材料的供货状态、对接头的性能要求以及焊接残余应力的水平等并通过焊接工艺评定试验来确定。例如英国BS标准已考虑按材料应达到性能，如对最大程度的软化、最高的常温抗拉强度和最高蠕变极限等规定不同的热处理工艺参数。

5）焊接工艺规程　低合金耐热钢焊接工艺规程的基本内容为坡口形式及尺寸、焊前准备要求、焊前预热温度和层间温度、焊接材料牌号和规格、焊接电参数、焊后热处理参数、焊接顺序及操作技术、接头焊后检查及合格标准。

对于重要的钢结构、锅炉、压力容器和管道等高温高压焊接部件，应按每种焊接接头编制焊接工艺规程并按相应的焊接工艺评定标准通过试验评定其合理性和正确性。只有焊接工艺评定合格的焊接工艺规程才能用于指导实际焊接生产。焊接工艺规程的具体内容参见2.5节焊接实例。

2.4　低合金耐热钢接头性能的控制

与普通碳钢和低合金钢相比，对耐热钢接头的性能提出了较高的要求，不仅是常温力学性能，而且更重要的是高温性能，包括高温蠕变极限（高温持久强度）、高温冲击韧度和抗回火脆性等都必须满足产品技术条件的要求。对于某些特殊的石化装置，对焊缝和热影响区的硬度还有严格的规定。

（1）对耐热钢接头性能的影响因素

1）合金成分的影响　焊缝中的碳显著地提高了钢的强度，但急剧地降低了韧度，使脆性转变温度上移。在某些低合金钢中，碳含量的提高与韧度的下降并不成比例关系。例如在2.25Cr-1Mo钢焊缝中，0.10%的碳含量是保证高韧度的最佳含量。而在Cr-Mo含量较低的焊缝中，最合适的碳含量是0.07%～0.08%。焊缝金属中的硅也具有双重的作用。硅作为一种还原元素对焊缝金属的性能起着有利作用，是保证焊缝致密性的必要元素之一。但硅在Cr-Mo钢焊缝中，对消除应力处理后的韧度产生不良影响。尤其是通过焊剂向焊缝金属渗硅，将急剧加重回火脆性倾向。对于某些有回火脆性倾向的Cr-Mo钢焊缝金属，硅含量应控制在0.1%以下。对于Cr-Mo含量较低的耐热钢焊缝金属，硅含量的合适范围是0.15%～0.35%。

在Cr-Mo钢焊缝金属中，锰的作用与硅相似，它促使偏析加剧，产生一定的有害影响。然而锰又促使显微组织中形

表4.4-9　各国制造法规要求的最低焊后热处理温度　℃

钢种＼制造法规	ANSI B31.1	ASME Ⅷ	BS3351	BS5500	JIS⑤ B8243	ISO TC11	推荐温度
0.5Mo	600～650	≥595	650～680	650～680	≥600	580～620	600～620
0.5Cr-0.5Mo	600～650	≥595	—	—	≥600	620～660	620～640
1Cr-0.5Mo	700～750	≥595	630～670	630～670③ 650～700②	≥680	620～660	640～680
1.25Cr-0.5Mo	—	≥595	630～670	630～670③ 650～700②	≥680	620～660	640～680
2.25Cr-1Mo	700～750	≥680	680～720① 700～750②	630～670④ 680～720① 700～750②	≥680	625～700	680～700
1Cr-Mo-V	—	—	—	—	—	—	720～740
2Cr-MoWVTiB	—	—	—	—	—	—	760～780

① 以提高蠕变极限为主；② 以软化焊缝为主；③ 以提高高温性能为主；④ 以提高常温强度为主；⑤ JIS＝日本工业标准。



成针状铁素体，从而提高焊缝金属的韧度。例如 1.25Cr-0.5Mo 钢焊缝金属中，锰含量从 0.5% 提高到 0.85%，低温缺口韧度有明显的提高。因此，气体保护焊的 Cr-Mo 钢焊丝中，锰含量的合适范围是 0.80% ~ 1.10%。

磷对焊缝金属的回火脆性有很不利的作用，图 4.4-11 示出磷含量与 2.25Cr-1Mo 钢焊缝金属 40J 转变温度的关系。从曲线可见磷含量控制在 0.012% 以下，可将磷的有害作用限制到最小的程度。

氧对 Cr-Mo 焊缝金属的韧度亦有不利的影响。图 4.4-12 示出 2.25Cr-1Mo 钢焊缝金属中氧含量与韧度的关系。由曲线可见，为确保焊缝金属的韧度，氧含量应控制在 400×10^{-6} 以下。使用高碱度焊剂和碱性药皮焊条可获得氧含量低于 350×10^{-6} 的焊缝金属。

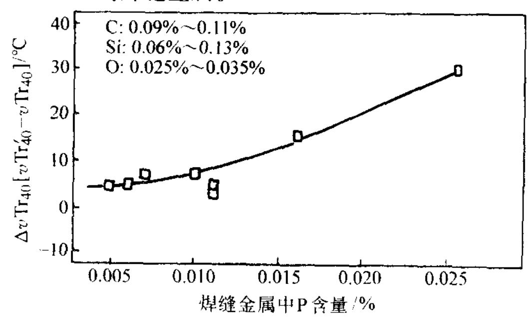


图 4.4-11　2.25Cr-1Mo 钢焊缝金属磷含量与 40 J 脆性转变温度位移量的关系

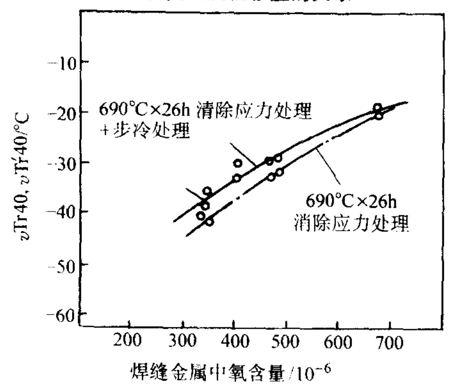


图 4.4-12　2.25Cr-1Mo 钢焊缝金属氧含量与 40 J 转变温度的关系〔w (C) 0.07% ~ 0.09%〕

各种合金元素和杂质对焊缝金属韧度的综合影响可以下式表达。

$$Tr_{20}=436w(\mathrm{C})-54w(\mathrm{Mn})+14w(\mathrm{Si})+268w(\mathrm{P})+819w(\mathrm{S})-61w(\mathrm{Cu})-29w(\mathrm{Ni})+13w(\mathrm{Cr})+23w(\mathrm{Mo})+355w(\mathrm{V})-112w(\mathrm{Al})\cdot+1138w(\mathrm{N})+380w(\mathrm{O})-235/1.8$$

式中合金成分含量的适用范围如下：w (C) 0.03 ~ 0.11%；w (Mn) 0.2% ~ 1.16%；w (Si) 0.05% ~ 1.2%，w (S) 0.006% ~ 0.11%；w (Cu) 0.05% ~ 0.3%；w (Ni) 0.05% ~ 0.14%；w (Cr) 0.05% ~ 2.6%；w (Mo) ≤ 1.2%；w (V) ≤0.36%；w (N) 0.004% ~ 0.02%；w (O) 0.007% ~ 0.19%；w (P) 0.004% ~ 0.17%。

2) 焊接热参数的影响　焊接热参数通常是指焊接线能量、预热温度和层间温度。焊接热参数直接影响接头的冷却条件。热参数愈高，冷却速度愈低，接头各区的晶粒愈粗大，强度和韧度则愈低。采用低的热参数，则提高接头的冷却速度，有利于细化接头各区的晶粒，改善显微组织而提高冲击韧度。但在低合金耐热钢焊接中，预热和保持层间温度是防止接头冷裂纹和再热裂纹的必要条件之一，故调整焊接热参数主要通过控制焊接线能量。大多数低合金耐热钢对焊接线能量在一定范围内的改变并不敏感。当焊接线能量超过 30 kJ/cm，预热和层间温度高于 250℃，则 Cr-Mo 钢焊缝金属的强度和冲击韧度会明显下降。图 4.4-13 和图 4.4-14 分别示出焊接线能量和预热及层间温度对 2.25Cr-1Mo 钢埋弧焊焊缝金属冲击韧度的影响。

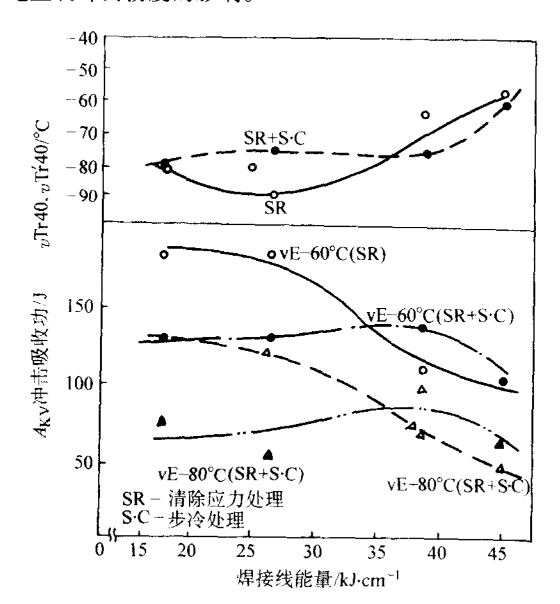


图 4.4-13　焊接线能量对 2.25Cr-1Mo 钢埋弧焊焊缝金属冲击韧度的影响

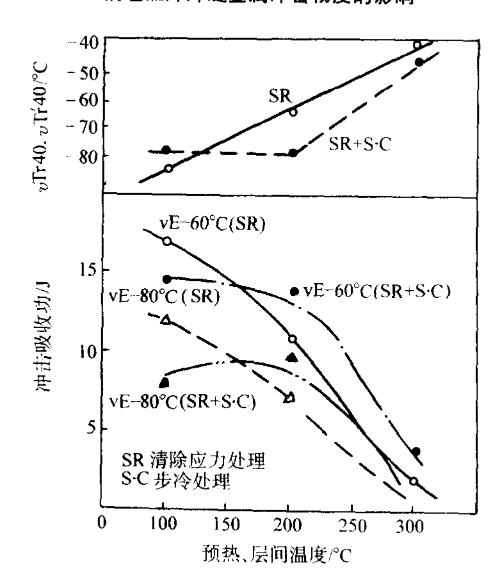


图 4.4-14　预热及层间温度对 2.25Cr-1Mo 钢埋弧焊焊缝金属冲击韧度的影响

3) 焊后热处理的影响　焊后热处理的工艺参数对低合金耐热钢焊接接头的力学性能产生复杂的影响。通常利用回火参数 [P] 来评定其影响程度。[P] 值由热处理温度和保温时间按下式计算：

$$[P]=T(20+\lg t)\times10^{-3}$$

式中，T 为热处理绝对温度，K；t 为保温时间，h。

在低合金耐热钢焊件的各种热处理参数中，回火参数 [P] 的变化范围约为 18.2 ~ 21.4。实际上，对于每种低合金耐热钢均有一个最佳范围，即最合适的热处理温度和保温时间范围。图 4.4-15 示出 1.25Cr-0.5Mo 钢焊缝金属的冲击吸收功与回火参数的关系。曲线清楚地表明，当回火参数在



20.0～20.6之间时，焊缝金属冲击功达到最高值。如回火参数低于20.0即在较低的回火温度和较短的保温时间下，焊缝金属的韧度明显下降，而当回火参数高于20.6时，则由于碳化物的沉淀和集聚使韧度再度下降。

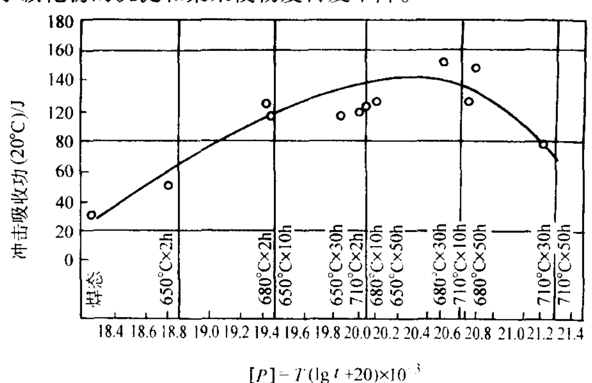


图 4.4-15　回火参数对 1.25Cr-0.5Mo 焊缝金属冲击韧度的影响

回火参数对焊缝金属强度性能亦有一定的影响，如图4.4-16所示。随着回火参数的提高，焊缝金属的抗拉强度和屈服强度不断下降。对于2.25Cr-1Mo钢焊缝金属，当回火

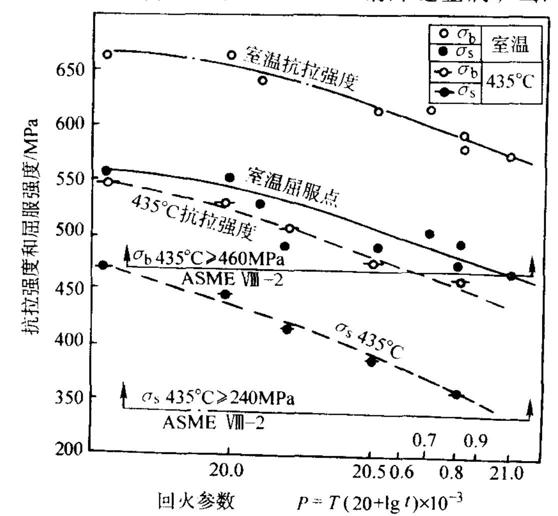


图 4.4-16　回火参数对 2.25Cr-1Mo 焊缝金属抗拉强度的影响

(δ = 50～150 mm)(C 0.12%，Cr 2.24%，Mo 0.94%)

参数超过20.65时，435℃的高温短时抗拉强度已降低到标准规定的下限值。回火参数20.65相当于690℃×30 h的回火处理。这就是说，为保证2.25Cr-1Mo钢焊缝金属的强度，在690℃回火时间不应超过30 h，如制造工艺过程要求工件多次热处理累计时间超过30 h则应适当降低回火温度。焊接接头各区的硬度与回火参数的关系与抗拉强度相似。

焊后热处理对低合金耐热钢焊接接头的高温持久强度有独特的影响。图4.4-17对比了三种不同热处理状态的2.25Cr-1Mo焊缝金属的蠕变极限。从中可见，较高的回火温度由于提高了组织稳定性而延长了蠕变断裂时间。延长回火处理保温时间同样有利于提高接头高温持久强度。

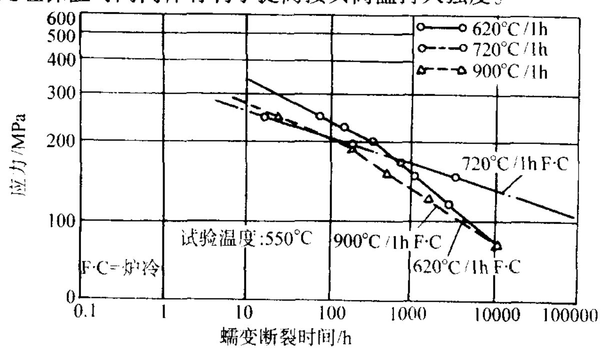


图 4.4-17　焊后热处理参数对 2.25Cr-1Mo 焊缝金属蠕变极限的影响

(2) 低合金耐热钢焊接接头力学性能典型数据

低合金耐热钢主要用于高温受压或承载焊接部件。接头力学性能，包括高温持久强度性能直接决定了焊件的运行可靠性和使用寿命，尤其是某些低合金耐热钢接头的高温持久强度往往低于母材标准的下限值。因此，必须积累大量的接头力学性能，特别是高温性能数据，作为结构强度计算的依据。在低合金耐热钢焊接工艺试验和新型焊接材料的研制过程中测定焊缝金属和接头的高温持久强度是必不可少的。表4.4-10列出1.25Cr-Mo钢各种焊接方法焊接的焊缝金属性能的典型数据。

2.5　低合金耐热钢焊接实例

低合金耐热钢在动力锅炉、汽轮机、高压蒸汽管道和各种炼油、石化设备中应用十分广泛。焊接实例甚多。本节仅列举三种具有代表性的低合金耐热钢焊件实例，其焊接工艺规程分别列于表4.4-11～表4.4-13。

表 4.4-10　铬钼低合金耐热钢焊缝金属性能的典型数据

钢　号	焊接方法	焊材牌号	焊缝金属化学成分(质量分数)/%							强度性能			冲击韧度吸收功/J	焊后热处理温度/℃	蠕变断裂强度(500℃，1 000h)/MPa
			C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%			
15CrMo A213-T12 A335-P11，12 A387-11，12	焊条电弧焊	E8016-B2	0.06	0.74	0.51	0.007	0.005	1.30	0.48	490 450℃ 352	587 450	29 24	－20℃ 147	690℃/1 h	176 (720℃/1 h)
	埋弧焊	F9P2-EG-B2	0.09	0.63	0.10	0.005	0.005	1.43	0.54	519 450℃ 411	627 490	28 18	－30℃ 157	650℃/1 h	147 (720℃/6h)
	氩弧焊	ER80S-G	0.02	1.10	0.48	0.009	0.010	1.03	0.50	480	578	31	0℃ 303	620℃/1 h	—
12Cr2Mo A387-22 A213、T22 A335-P22 10CrMo910	焊条电弧焊	E9016-B3	0.12	0.74	0.35	0.006	0.003	2.40	0.98	460 450℃ 362	617 470	26 20	－30℃ 127 步冷处理 －30℃ 117	690℃/27 h	127 (690℃/27 h)



续表 4.4-10

钢　号	焊接方法	焊材牌号	焊缝金属化学成分（质量分数）/%							强度性能			冲击韧度吸收功/J	焊后热处理温度/℃	蠕变断裂强度（500℃，1 000 h）/MPa
			C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ%			
12Cr2Mo A387-22 A213-722 A335-P22 10CrMo910	埋弧焊	F9P2-EG-B3	0.11	0.85	0.10	0.006	0.005	2.34	1.04	470 450℃ 352	607 440	27 19	-30℃ 147 步冷处理 -30℃ 117	690℃/8 h	166 （690℃/8 h）
	氩弧焊	ER90S-G	0.03	1.09	0.49	0.009	0.010	2.22	1.01	519	627	28	0℃ 254	690℃/1 h	137

表 4.4-11　15CrMo 钢压力容器筒身纵缝电渣焊焊接工艺规程（实例）

焊接方法	电　渣　焊	母　材	钢号　15CrMo 规格　80 mm
坡口形式/mm	（图：坡口间隙 32^{+2}_{0}，板厚 80）	焊前准备	1）清除坡口氧化皮 2）磁粉探伤坡口表面检查裂纹 3）装配 Π 形铁和引弧板 点固焊，拉紧焊缝采用 J507 焊条 焊前预热 150 ~ 200℃
焊接材料	焊条牌号：R307（E5515-B2）ϕ4 mm，ϕ5 mm，用于补焊 焊丝牌号：H13CrMo　ϕ3 mm 焊剂牌号：HJ-431		
预热及层间温度	预热温度：－ 层间温度：－ 后热温度：－	焊后热处理参数	正火温度：　930 ~ 950℃/1.5 h 回火温度：　650℃ ± 10℃/4 h 消除应力热理：　630℃ ± 10℃/3 h
焊接工艺参数	焊接电流：500 ~ 550 A（每根焊丝） 焊接电压：41 ~ 43 mm 焊丝干伸长：60 ~ 70mm	熔池深度：50 ~ 60 mm 焊丝根数：2 焊接速度：~ 1.4 m/h	
操作技术	焊接位置：立焊 焊道层数：单层	焊接方向：　自下而上 焊丝摆动参数：不摆动	
焊后检查	正火处理后 100%超声波探伤		

表 4.4-12　2.25Cr-1Mo 钢厚壁压力容器环缝埋弧焊工艺规程

焊接方法	埋　弧　焊	母　材	钢号：A387-22 规格：90 mm
坡口形式及尺寸/mm	（图：$8^{0+1°}_{0}$，$R10^{+1}_{0}$，90，3^{0}_{-1}，10^{-1}_{0}，70°）	焊前准备	1）查坡口尺寸和焊缝错边是否符合图样要求 2）清理坡口两侧 20 mm 及焊丝表面的油污氧化皮 3）焊条和焊剂焊前 350 ~ 400℃/2 h 烘干
		焊接顺序	1）先焊条电弧焊底焊内环缝连续焊满坡口 2）外环缝埋弧焊，焊前无需清根，连续焊满
焊接材料	焊条牌号：E6015-B2（R407）　规格：ϕ4 mm，ϕ5 mm， 焊丝牌号：H08Cr3MoMnA　规格：ϕ4 mm 焊剂牌号：SJ101		
预热温度	预热温度：150 ~ 200℃ 层间温度：≥150℃ 后热温度：250℃/1 h	焊后热处理参数	焊后消除应力处理 730℃ ± 10℃/4 h
焊接工艺参数	焊接电流：焊条电弧焊：180 ~ 240 A 埋弧焊：600 ~ 650 A 电弧电压：焊条电弧焊：23 ~ 25 V 埋弧焊：35 ~ 36 V	焊接速度：埋弧焊 25 ~ 28 m/h 焊丝伸出长度：40 ~ 50 mm 直流反接极	
操作技术	焊接位置：平焊 焊道层数：多层多道 焊丝摆动参数：不摆动		
焊后检查	1）焊接结束 48 h 后 100%超声波探伤 + 25%射线检查 2）热处理后，焊缝表面分别作 100%磁粉探伤		

表 4.4-13 13MnNiMo54 电站锅炉锅筒环缝窄间隙埋弧焊（实例）

焊接方法	窄间隙埋弧焊	母 材	钢号：13MnNiMo54 规格：100 mm
坡口形式及尺寸/mm	1.5°$^{+0.5}_{0}$ 100 3$_{-1}$ R10±0.5 10$^{+1}_{0}$ 70°$^{+2}_{0}$	焊前准备	检查坡口尺寸和焊缝错边是否符合图纸要求 清理坡口两侧 20 mm 及焊丝表面的油污氧化皮 焊条和焊剂焊前 350 ~ 400℃/2 h 烘干
		焊接顺序	1）先从筒体内面焊条电弧焊底焊连续焊满坡口 2）从筒体外侧窄间隙埋弧焊。焊前不清根，连续焊满
焊接材料	焊条牌号：E6015（J607）ϕ4 mm，ϕ5 mm 焊丝牌号：S4Mo（H08Mn2MoA） ϕ3 mm 焊剂牌号：SJ101		
预热及后热温度	预热温度：150 ~ 200℃ 层间温度：≤250℃ 后热温度：150 ~ 200℃/1 h	焊后热处理参数	590 ~ 610℃/7 h 消除应力处理
焊接工艺参数	焊接电流：焊条电弧焊 180 ~ 240 A 埋弧焊： 首层 550 ~ 600 A 其他层： 500 ~ 510 A 电弧电压：焊条电弧焊 23 ~ 25 V 埋弧焊 29 ~ 32 V		
操作技术	1）焊接位置：平焊 2）焊道层数：多层双道焊 3）焊丝离侧壁距离：3 ~ 4 mm		
焊后检查	1）焊接结束 48 h 后，100% 超声探伤 + 100% 射线照相检查 2）热处理前后，焊缝表面分别做 100% 磁粉探伤		

3 中合金耐热钢的焊接

3.1 中合金耐热钢的化学成分和力学性能

在动力化工和石油等工业部门经常使用的中合金耐热钢有：5Cr-0.5Mo、7Cr-0.5Mo、9Cr-1MoV、9Cr1MoVNb、9Cr-2Mo、9Cr-2MoVNb 等。这类耐热钢的主要合金元素是 Cr，其使用性能主要取决于 Cr 含量，Cr 含量愈高，耐高温性能和抗高温氧化性能愈好。在常规的碳含量下，所有中合金铬钢的组织均为马氏体组织。为提高铬钢的蠕变极限并降低回火脆性，通常加入 0.5% ~ 1% 的钼。为改善铬钢的焊接性，控制过冷奥氏体的转变速度，在降低碳含量的同时，加入了 W、V、Ti 和 Nb 等合金元素。近年来已研制出多种焊接性尚可的低碳多元中合金耐热钢，例如碳含量为 0.19% 的 9Cr1MoVNb、9Cr1MoWVNb 和 9Cr-0.5Mo-1.8WVNb（ASMET92）等钢，其性能填补了低合金珠光体耐热钢和高合金奥氏体耐热钢之间的空白。这些抗氧化性和耐热性良好的中合金耐热钢在高温高压锅炉和炼油高温设备中部分取代了高合金奥氏体耐热钢。

一些常用的中合金耐热钢的标准化学成分和力学性能分别列于表 4.4-14 和表 4.4-15。

这些钢的高温性能数据，包括抗氧化的极限温度、不同工作温度下的最高许用应力值综列于表 4.4-16。5Cr-0.5Mo、7Cr-0.5Mo、9Cr-1MoV 三种钢的接头的高温蠕变极限曲线分别列于图 4.4-18 ~ 图 4.4-20。

中合金耐热钢由于其合金含量较高，具有相当高的空淬特性。为保证其优良的综合力学性能，钢材轧制成材后，必须作相应的热处理。这些热处理包括：等温退火、完全退火和正火加回火。

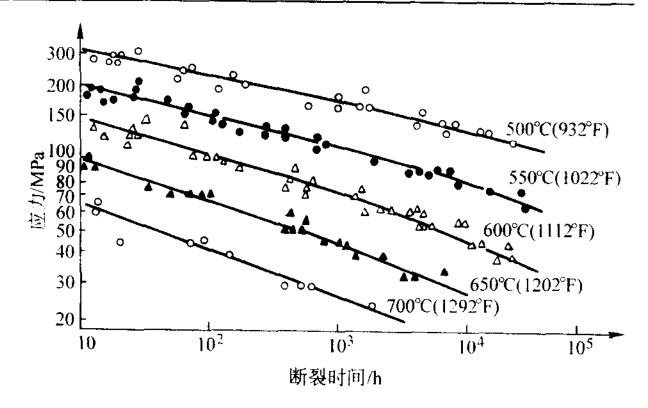


图 4.4-18 5Cr-0.5Mo 钢的蠕变极限曲线（热处理状态：等温退火）

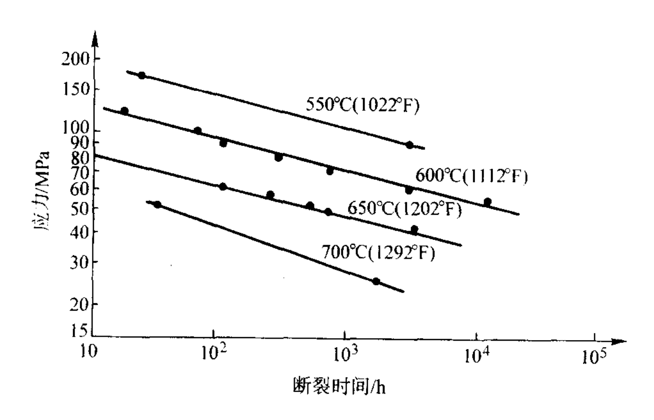


图 4.4-19 7Cr-0.5Mo 钢的蠕变极限曲线（热处理状态：等温退火）



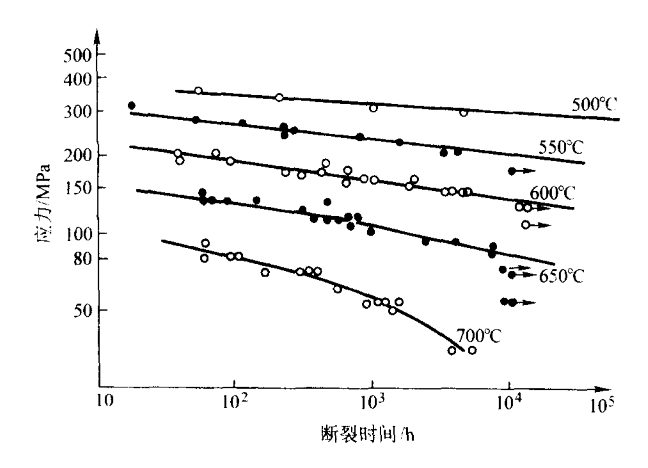


图 4.4-20　9Cr-1MoV 钢的蠕变极限曲线

3.2　中合金耐热钢的焊接特性

（1）淬硬倾向

中合金耐热钢普遍具有较高的淬硬倾向，图 4.4-21 示出铬钢的组织状态图。从中可见在铬含量为 5%～10% 的钢中，如碳含量高于 0.10%，其在等温热处理状态下的组织均为马氏体。

马氏体的硬度则取决于钢中的碳含量和奥氏体化温度。降低碳含量可使奥氏体化温度的变化对硬度的影响减小。当碳含量低于 0.05% 时，其最高硬度可降低到 HV350 以下，即不会导致焊接冷裂纹的形成。但对耐热钢十分重要的是，过低的碳含量将使钢的蠕变极限急剧下降。为保证耐热钢的高温蠕变，又兼顾焊接性，中合金耐热钢的碳含量一般控制在 0.10%～0.20% 的范围内。在这种情况下，接头热影响区的组织均为马氏体组织。其硬度一方面取决母材的实际碳含量和合金成分，另一方面亦取决于焊接和焊后热处理的温度参数和冷却条件。图 4.4-22 示出 9Cr1MoWVNb 钢的连续冷却组织转变图。当以较高的速度冷却时，其组织为全马氏体，最高硬度可达 HV464。图 4.4-23 示出一种 9Cr-1MoVNb 钢焊接接头在焊后状态和焊后热处理状态下硬度实测结果。由曲线可见，焊后状态的焊缝和热影响区硬度均超过了容许的最高硬度。经过适当的焊后热处理，接头各区的硬度降低到了容许的范围之内。因此，中合金耐热钢焊接接头的焊后热处理是必不可少的。

表 4.4-14　常用中合金耐热钢的标准化学成分（摘自 GB 5310—1995，GB 9948—1988）

钢　种	钢　号	化学成分（质量分数）/%										
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb	N	Ni
5Cr-0.5Mo	1Cr5Mo A213-T5 A335-P5 （ASTM）	≤0.15 ≤0.15	≤0.50 ≤0.50	≤0.60 0.30～0.60	≤0.035 ≤0.030	≤0.030 ≤0.030	4.0～6.0 4.0～6.0	0.45～0.60 0.45～0.65	— —	— —	—	— —
7Cr-0.5Mo	A213-T7 A335-P7 （ASTM）	≤0.15	0.50～1.00	0.30～0.60	≤0.030	≤0.030	6.0～8.0	0.45～0.65	—	—	—	—
9Cr-1Mo	A213-T9 A335-P9 （ASTM）	≤0.15	0.25～1.00	0.30～0.60	≤0.030	≤0.030	8.0～10.0	0.90～1.10	—	—	—	—
9Cr-1MoV	A213-T91 （ASTM）	0.08～0.12	0.20～0.50	0.30～0.60	≤0.020	≤0.010	8.0～9.50	0.85～1.05	0.18～0.25	0.06～0.10	—	—
9Cr-1MoVNb	10Cr9Mo1VNb	0.08～0.12	0.30～0.50	0.30～0.60	≤0.020	≤0.010	8.0～9.50	0.85～1.05	0.18～0.25	0.06～0.10	0.03～0.07	≤0.40
5CrMoW-VTiB	10Cr5Mo-WVTiB	0.07～0.12	0.40～0.70	0.40～0.70	≤0.030	≤0.030	4.5～6.0	0.48～0.65	0.20～0.33	Ti 0.16～0.24	W 0.20～0.40	B 0.008～0.014

表 4.4-15　常用中合金耐热钢标准力学性能指标

钢　种	钢　号	拉　伸　性　能			冲击吸收功/J	备　注
		屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	δ/%	+20℃	
5Cr-0.5Mo	1Cr5Mo A213-T5 A335-P5	≥195 ≥206	≥390 ≥414	22 ≥30	A_{ku}　92 —	HB 187 退火状态
5CrMoWVTiB	10Cr5MoWVTiB	≥392	539～735	≥18	—	
7Cr-0.5Mo	A213-T7 A335-P7	≥206	≥414	≥30	—	
9Cr1Mo	A213-T9 A335-P9	≥206	≥414	≥30	—	
9Cr1MoV	A213-T91	≥414	≥586	≥20	—	
9Cr1MoVNb	10Cr9Mo1VNb	≥415	≥585	≥20	A_{kv}　35	横向 A_{kv} 27



表 4.4-16　中合金耐热钢高温性能数据

钢种及钢号		5Cr-0.5Mo 1Cr5Mo (A213-T5) (A335-P5)	7Cr-0.5Mo 1(213-T7) (A335-P7)	9Cr1Mo (213-T9) (A335-P9)	9CrMoVNb 10Cr9Mo1VNb X10CrMoVNb91	9Cr-MoV (A213-T91)
抗氧化极限温度/℃		650	673	673	673	673
不同工作温度下的最高许用应力值/MPa	300℃	98	98	99	108	144
	350℃	96	93	96	—	—
	400℃	91	78	91	103	133
	450℃	84	85	84	—	—
	500℃	63	63	77	88	110
	550℃	35	35	48	74	94
	600℃	18	18	21	47	66
	650℃	9	9	10	25	29

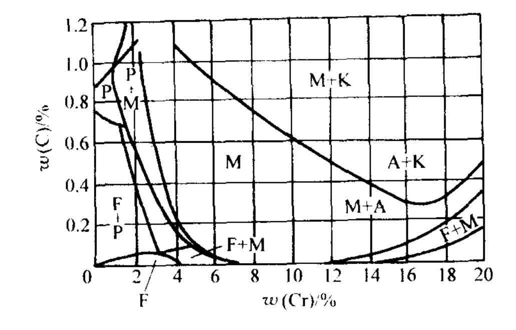
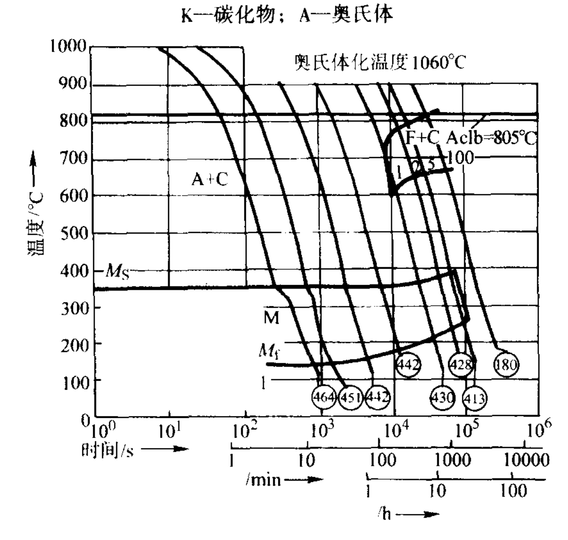


图 4.4-21　铬钢的组织状态图

F—铁素体；P—珠光体；M—马氏体；K—碳化物；A—奥氏体



w (C)	w (Si)	w (Mn)	w (P)	w (S)	w (Al)	
0.115	0.200	0.51	0.017	0.002	0.007	
w (Cr)	w (Ni)	w (Mo)	w (V)	w (W)	w (N)	w (Nb)
8.85	0.24	0.94	0.22	0.95	0.084	0.069

图 4.4-22　9Cr1MoWVNb 钢连续冷却组织转变图

ATC—奥氏体 + 碳化物；F + C—铁素体 + 碳化物；M—马氏体

这里应当指出，在合金成分中的碳化物形成元素，如钒、钨、铌和钛等对中合金钢的转变特性有较大的影响。不加碳化物形成元素的 5Cr-1Mo 钢，其淬透性较大，即使自 1 050℃ 奥氏体化温度缓慢冷却时，亦会形成脆性组织，具有高的硬度和低的变形能力。在正火状态下，钢的组织为托氏体 + 碳化物。焊后热处理则促使碳化物从马氏体固溶体中析出而形成回火马氏体。以镍、钒和钛等稳定的 5Cr-0.5Mo 钢具有不同的转变特性。这种钢在相当宽的冷却速度范围内均发生贝氏体转变，钢在正火状态下具有均一的贝氏体组织。而马氏体转变区很窄，只有在相当高的冷却速度下（不小于 250℃/s）才能形成马氏体。在弧焊接头的热影响区内，只是在毗邻熔合线的过热区形成少量的马氏体。其余部分均为贝氏体组织，使接头具有较高的韧度和抗裂性。

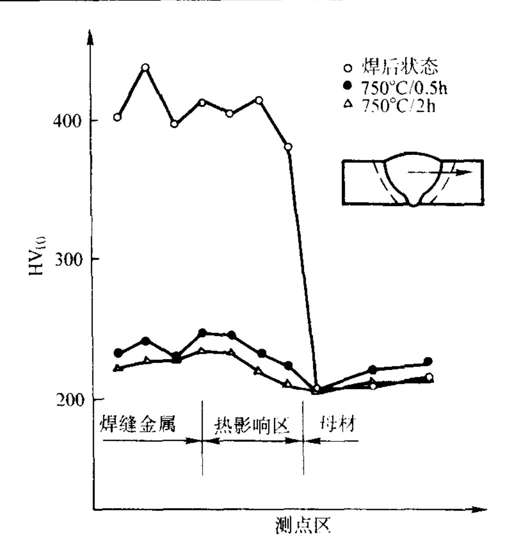
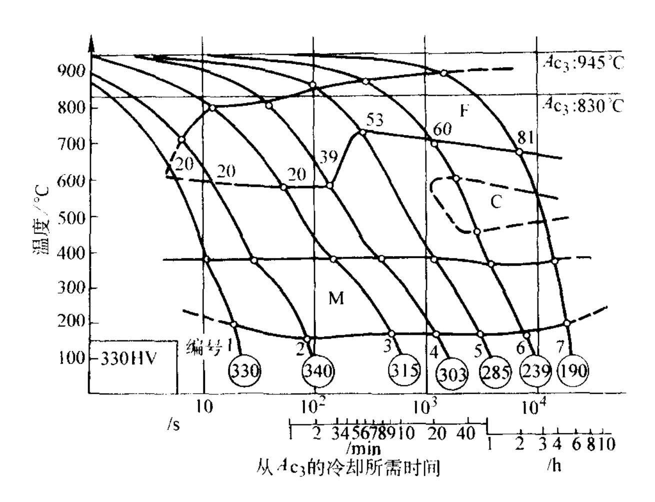


图 4.4-23　9Cr1MoVNb 钢焊接接头的硬度曲线

在 9Cr-1Mo 钢中碳化物稳定元素亦会产生类似的作用。例如 9Cr1MoVWNbB 钢在 1 120 ~ 1 180℃ 正火 + 750 ~ 810℃ 回火处理后具有贝氏体 + 铁素体组织。采用 170A 焊接电流钨极氩弧焊焊接时，焊接热影响区的最高硬度，无论焊前预热或不预热，均不超过 HV350。按标准规定的试验条件，Y 形坡口对接抗裂试验表明，这种钢只要预热 125℃ 即可防止裂纹的形成。可见，稳定型 9Cr-1Mo 钢具有较好的焊接性。

改善中铬耐热钢焊接性的另一条途径是降低碳含量并适当提高 Mo、V 等合金元素含量，以保持其高温持久强度。图 4.4-24 示出一种低碳 9Cr-2Mo 钢的连续冷却组织转变图。从中可见，即使在较快的冷却速度下，仍可产生一定量的铁素体转变，而最终形成铁素体和马氏体的混合组织，降低了对焊接裂纹的敏感性并有利于稳定高温强度。表 4.4-17 对比了低碳 9Cr-2Mo 钢和常规碳含量的 9Cr-1Mo 钢 Y 形坡口对接拘束冷裂试验结果，低碳 9Cr-2Mo 钢的抗裂性明显高于标准的 9Cr-1Mo 钢。试样横截面的硬度测定结果（见图 4.4-25）

也说明，在焊后状态，低碳 9Cr-2Mo 钢的热影响区的硬度大大低于标准的 9Cr-1Mo 钢，焊前预热 100℃，足以防止冷裂纹的形成。



钢成分(质量分数)/%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
	0.07	0.31	0.51	0.017	0.019	9.04	2.00

图 4.4-24　低碳 9Cr-2Mo 钢连续冷却组织转变图

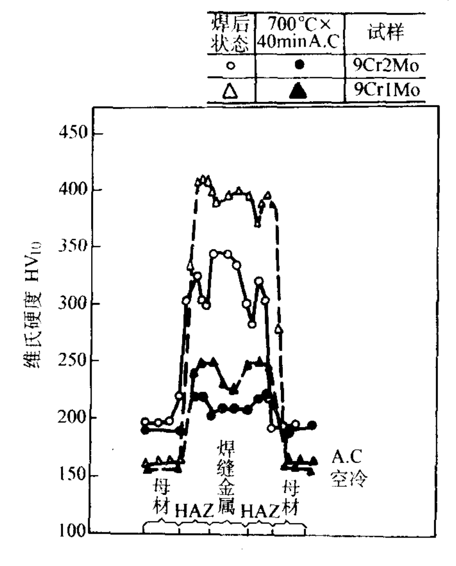


图 4.4-25　低碳 9Cr-2Mo 钢和 9Cr-1Mo 钢接头试样横截面的硬度测定结果对比

表 4.4-17　低碳 9Cr-2Mo 钢和标准 9Cr-1Mo 钢 Y 形坡口对接拘束冷裂试验结果对比

钢　种	检查剖面数	裂纹率/%			
		预热温度/℃			
		250	200	100	20
低碳 9Cr-2Mo	5	0	0	0	33
标准 9Cr-1Mo	5	7	7	10	100

(2) 焊接温度参数

焊接温度参数对中合金耐热钢焊接的成败起着关键的作用。对于壁厚在 10 mm 以上的焊件，为防止冷裂和高硬度区的形成，200～300℃的预热是必要的。当中合金耐热钢的碳含量在 0.1%～0.2% 范围内时，可采用图 4.4-26a 所示的焊接温度参数，即将预热温度控制在 M_s 点以下，使一部分奥氏体在焊接过程中转变为马氏体。由于焊接层间温度始终保持在 230℃以上，因此不会形成裂纹。焊接结束后将工件冷却到 100～125℃，使部分未转变的残余奥氏体转变为马氏体。接着立即将焊件作 720～780℃温度范围内的回火处理。如中合金耐热钢的碳含量低于 0.1%，则可按图 4.4-26b 所示焊接温度参数焊接。其主要区别在于焊件焊接结束后，将焊件缓慢冷却至室温，使接头各区完全转变成马氏体。接着立即进行 750℃的回火处理。

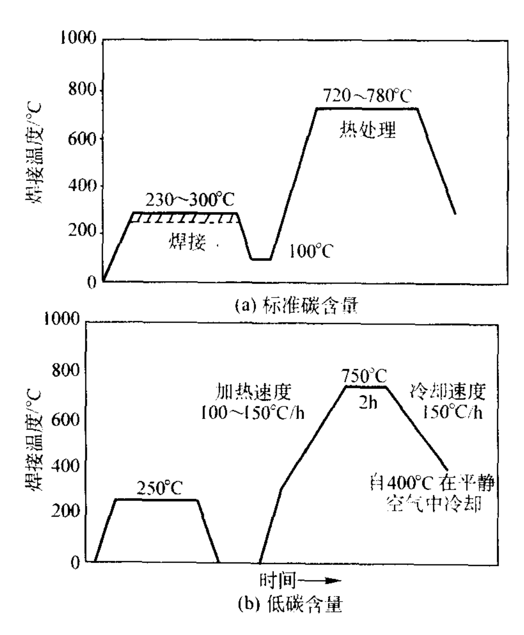


图 4.4-26　中合金耐热钢的焊接温度规范

焊后回火的温度和保温时间对中合金耐热钢接头的力学性能，特别是韧度有较大的影响。一般的规律是，回火的温度愈高，保温时间愈长，低温缺口冲击韧度就愈高。但过高的回火温度对接头的抗拉强度不利。当回火温度从 700℃提高到 775℃，屈服强度和抗拉强度约降低 200～250 MPa。回火参数的选择应兼顾强度和韧度。

3.3　中合金耐热钢的焊接工艺

(1) 焊接方法

中合金耐热钢由于淬硬和裂纹倾向较高，在选择焊接方法时，应优先采用低氢的焊接方法，如钨极氩弧焊和熔化极气体保护焊等。在厚壁焊件中，可选择焊条电弧焊和埋弧焊，但必须采用低氢碱性药皮焊条和焊剂。

电渣焊的热循环对中合金钢的焊接十分有利。通常焊前无需预热。但在焊接空淬倾向特别高的钢材时，利用电渣焊过程本身的热量很难保持规定的层间温度。特别是对于长焊缝，在整条焊缝焊完之前，焊缝端部已冷却至室温，加上电渣焊焊缝金属和过热区组织晶粒粗大，很容易在焊后热处理之前已形成裂纹。因此中合金耐热钢电渣焊的温度参数必须保持在焊接工艺规程的范围之内。

(2) 焊前准备

中合金耐热钢热切割之前，必须将切割边缘 200 mm 宽度内预热到 150℃以上。切割面应采用磁粉探伤检查是否存在裂纹。焊接坡口应机械加工，坡口面上的热切割硬化层应清除干净，必要时应作表面硬度测定加以鉴别。

接头坡口形式和尺寸的设计原则是尽量减少焊缝的横截面。在保证焊缝根部全焊透的前提下应尽量减小坡口张开角或减小 U 形坡口底部圆角半径，缩小坡口宽度，这样可使焊接过程在尽可能短的时间内完成，容易实现等温焊接工艺。对于中合金耐热钢来说，最理想的坡口形式为窄间隙或窄坡口，不管焊件壁厚多大，窄间隙或窄坡口的宽度，对于



埋弧焊通常为 18 ~ 22 mm，对于熔化极气体保护焊为 14 ~ 16 mm，对于钨极氩弧焊或热丝钨极氩弧焊为 8 ~ 12 mm。

（3）焊接材料的选择

中合金耐热钢焊接材料的选择有两种方案。一种方案是选用高铬镍奥氏体钢焊材，即异种焊材。另一种方案是选择与母材合金成分基本相同的中合金钢焊材。在早期，焊接工程界倾向于选择第一种方案，因为采用高铬镍奥氏体钢焊材确实是防止中合金钢焊接接头热影响区裂纹的有效措施，且焊接工艺简单，焊前无需预热，焊后可不做热处理。但设备的运行经验表明，这种异种钢接头在高温下长期工作时，由于铬镍钢焊缝金属的线膨胀系数与中合金铬钢有较大的差别，接头始终受到较高的热应力作用，加上异种钢接头界面存在高硬度区，最终将导致接头的提前失效。

中合金钢焊材的设计原则是，在保证接头具有与母材相当的高温蠕变极限和抗氧化性的前提下改善其焊接性。首先，为保持接头的高温强度，焊缝金属必须含有与母材相当的铬和钼含量。但在焊材中，铬含量不宜过高，因铬能与碳、铁等形成复杂的碳化物 [$(Fe\cdot Cr)_3C$] 对钢的焊接性产生不利影响，提高钢的空淬倾向。为解决这一矛盾，可采用铌、钒和钛等元素对铬钼钢渗合金。因为这些元素能形成高度稳定的碳化物，在电弧焊短时的热周期作用下，这些碳化物来不及溶解于固溶体中，从而使奥氏体内碳含量降低。随之过冷能力减弱，促使其在较高的温度下分解成珠光体型组织，因而提高了焊缝金属的韧度和抗裂性。在这些碳化物形成元素中，铌含量应严格控制，铌在中铬钢中会急剧提高焊缝金属的热裂倾向。因此，中铬钢焊材中的铌含量一般控制在 0.10%以下。

钛是一种强烈的碳化物形成元素，但对氧的亲和能力也相当高，在氧化性的电弧气氛中的过渡系数相当小。因此，只有在惰性气体保护焊时，才能有效利用焊丝中的钛。通常，在中合金耐热钢焊接材料中，大都采用钒作为附加的合金元素。钒是对碳亲和力最大的活性元素，它能与碳结合成稳定碳化钒 V_4C_3。钒也能作为盐浴校正剂和细化晶粒的元素起有利的作用，改善了中铬钢的焊接性，降低了钢的空淬倾向。但过量的钒对焊缝金属的回火脆变产生不利的影响。中合金耐热钢焊材中钒含量控制在碳含量的 2 ~ 3 倍为宜。

在中铬钢焊缝金属中，碳含量的影响比较复杂，且随铬含量的不同而异。当铬含量在 9%以下时，增加碳含量加剧了焊缝金属的裂纹倾向，降低了韧度。图 4.4-27 示出碳含量对 9Cr-1Mo 钢焊缝金属热裂纹倾向的影响。但过低的碳含量明显地降低焊缝金属的常温和高温抗拉强度。对 9Cr-1Mo 钢而言，最合适的碳含量为 0.06% ~ 0.1%。

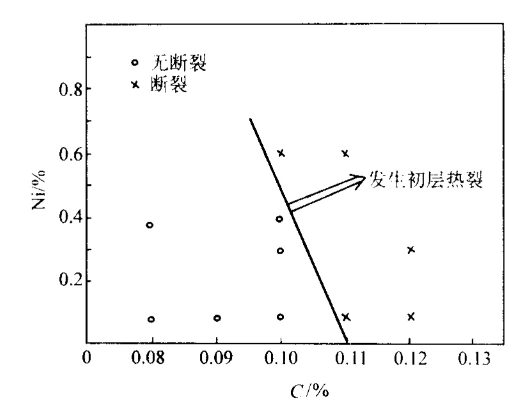


图 4.4-27 碳含量对 9Cr-1Mo 钢焊缝金属热裂纹倾向的影响

各种常见的合金元素对中铬钢焊缝金属性能的影响可用 Cr 当量来表征，每种中铬钢焊缝均可通过试验得出最佳的 Cr 当量。对于 9Cr-2Mo 钢可按下列公式计算 Cr 当量：

$$w(Cr)_e = w(Cr) + 4w(Si) + 1.5w(Mn) - [22w(C) + 0.5w(Mn) + 1.2w(Ni)]$$

图 4.4-28 示出 9Cr-2Mo 钢焊缝金属的 Cr 当量与韧度的试验结果。由图示曲线可知，对于焊条电弧焊和埋弧焊，焊缝金属的 $w(Cr)_e$ 控制在 9.2 以下可获得高韧度的单相马氏体组织。对于钨极氩弧焊焊缝金属，即使焊缝金属处于马氏体和铁素体组织，仍能达到较高的冲击韧度。

中合金耐热钢焊接材料在我国至今尚未完全标准化。在国外，大部分中铬钢焊材已纳入标准。常用的标准型和非标准型中合金耐热钢焊接材料型号和牌号及其化学成分列于表 4.4-18。

所有中合金钢焊条和焊剂为低氢或超低氢的。焊材保管、再烘干制度基本与低合金耐热钢焊材相同。

（4）预热和焊后热处理

在中合金耐热钢焊接时，预热是不可缺少的重要工序，是防止裂纹、降低接头各区硬度和焊接应力峰值以及提高韧度的有效措施。焊前的预热温度对于成熟钢种可按制造法规的要求选定。对于新型钢种，可根据抗裂性试验来确定。目前，测定钢材最低预热温度较可靠的定量试验法是插销冷裂试验。9Cr-1Mo 钢临界断裂应力与最低预热温度的关系示于图 4.4-29。

表 4.4-18 中合金耐热钢常用焊接材料标准型号和牌号及其化学成分

适用钢种	焊材国标型号	焊材牌号	化学成分（质量分数）/%								
			C	Mn	Si	Cr	Mo	V	S	P	其他
1Cr5Mo A213-T5 A335-P5	E5MoV-15 E801X-B6 （AWS）	R507	≤0.12	0.50 ~ 0.90	≤0.50	4.5 ~ 6.0	0.40 ~ 0.70	0.10 ~ 0.35	≤0.030	≤0.035	
10Cr5MoWVTiB	—	R517A	≤0.12	0.50 ~ 0.80	≤0.70	5.0 ~ 6.0	0.60 ~ 0.80	0.25 ~ 0.40	≤0.015	≤0.020	W：0.25 ~ 0.45 Nb：0.04 ~ 0.14
A213-T7，T9	E9Mo-15	R707	≤0.15	0.50 ~ 1.00	≤0.50	8.5 ~ 10.0	0.70 ~ 1.00	—	≤0.030	≤0.035	
A335-P7，P9	E801X-B8 （AWS） E505-15 （AWS）	R717A	≤0.08	0.50 ~ 1.00	≤0.50	8.5 ~ 10.0	0.80 ~ 1.10	—	≤0.015	≤0.020	Ni：0.50 ~ 0.80
A213-T91 10Cr9Mo1VNb	E901X-B9 （AWS）	R717	≤0.12	0.06 ~ 1.20	≤0.50	8.0 ~ 9.5	0.80 ~ 1.10	0.15 ~ 0.40	≤0.030	≤0.035	Ni：0.40 ~ 1.00 Nb：0.02 ~ 0.08



利用图4.4-29的关系曲线，可按实测的临界断裂应力简易地推算出最低预热温度。不过，焊件的实际预热温度应根据接头的拘束度、焊接方法、焊接线能量和焊缝金属内实测的扩散氢含量等加以适当的调整。如采用低氢的焊接方法和大线能量焊接，则实际使用的预热温度可略低于插销冷裂试验测定的预热温度。而在焊接高拘束度接头或焊缝金属扩散氢含量较高时，则应适当提高预热温度。

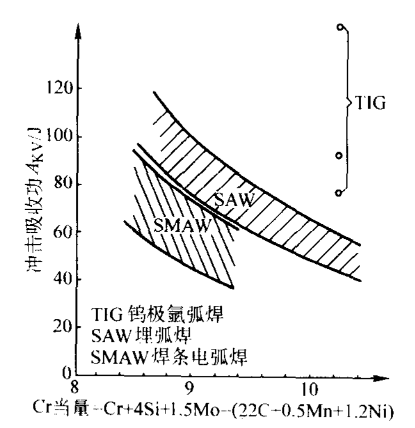


图4.4-28 9Cr-2Mo钢焊缝金属的Cr当量与韧度的关系

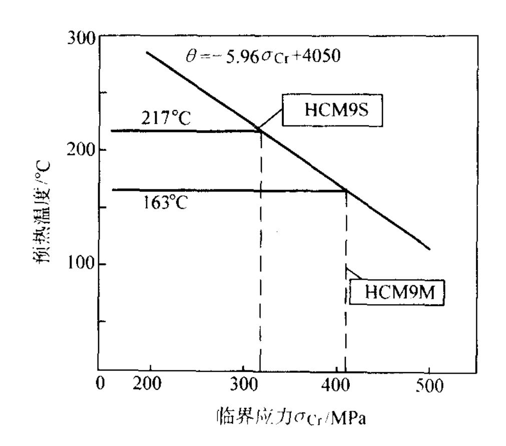


图4.4-29 9Cr-1Mo钢临界断裂应力σ_{Cr}与最低预热温度的关系

表4.4-19列出推荐的中合金耐热钢的最低预热温度，同时也示出各国压力容器和管道制造法规对中合金耐热钢规定的最低预热温度。

表4.4-19 各国制造法规要求的中合金耐热钢的最低预热温度

钢　种	推荐温度		ASME Ⅷ		BC 5000		ANSI B31.3		BS3351（低氢焊条）	
	厚度/mm	温度/℃	厚度/mm	温度/℃	厚度/mm	温度/℃	厚度/mm	温度/℃	厚度/mm	温度/℃
5Cr-0.5Mo	≥6	200	≤13 >13	150 204	所有厚度	200	所有厚度	175	所有厚度	200
7Cr-0.5Mo	≥6	250	所有厚度	204	所有厚度	200	所有厚度	175	所有厚度	200
9Cr-1Mo 9Cr-1MoV 9Cr-2Mo	≥6	250	所有厚度	204	所有厚度	200	所有厚度	175	所有厚度	200

中合金耐热钢焊件的焊后热处理在各国制造法规中做了强制性的规定，其目的在于改善焊缝金属及其热影响区的组织，使淬火马氏体转变成回火马氏体，降低接头各区的硬度，提高其韧度、变形能力和高温持久强度并消除内应力。中合金耐热钢焊件常用的焊后热处理有：完全退火、高温回火或回火＋等温退火等。

各种中合金耐热钢焊件焊后热处理的最佳工艺参数可通过系列回火试验来确定。图4.4-30示出9Cr-1MoV钢焊接接头的力学性能和冲击韧度与回火参数的关系。回火参数对接头的强度性能和冲击韧度都有明显的影响。在实际生产中，从经济观点出发，应根据对接头提出的主要性能指标要求，为每种焊件选定最合理的焊后热处理参数。各国压力容器和管道制造法规对中合金耐热钢焊后热处理的推荐的温度范围列于表4.4-20。

（5）焊接工艺规程

中合金耐热钢的焊接工艺规程所列的项目和焊接工艺参数基本上与低合金耐热钢相同。所不同的是必须明确规定焊接结束后焊件在冷却过程中容许的最低温度以及焊后到热处理的时间间隔。这两个工艺参数对于保证中合金耐热钢接头无裂纹和高韧度是十分重要的。对于厚壁焊件还应规定接头容许的冷却速度和焊后立即消氢处理工艺。对于中合金耐热钢焊件，应按接头的形式编制焊接工艺规程，且必须按相应的标准通过工艺评定。在焊接工艺评定中，应将焊件在焊接结束后冷却过程中容许的最低温度、焊件的冷却速度以及焊后到热处理的时间间隔作为重要的参数。同时应注意焊接工艺评定的试验条件尽可能与焊接施工条件接近。试板的厚度应等于或接近产品接头的厚度。试板焊后热处理的保温时间应按产品制造过程中接头实际可能经受的总热处理时间考虑。评定试板焊接过程中的预热温度、层间温度以及焊后热处理温度应采用精度符合要求的测温仪正确测定。中合金耐热钢焊接工艺规程的具体内容参见3.5节焊接实例。

3.4 中合金耐热钢焊接接头的力学性能

（1）中合金耐热钢焊接接头性能的影响因素

中合金耐热钢大部分用于动力锅炉、石油化工和炼油装置的高温高压部件。其焊接接头不仅应具有与母材大致相同的常温和高温短时强度，而且还应具有符合设备长期安全运行要求的高温蠕变极限和抗长时高温时效以及低温韧度和高温韧度。

1）合金成分的影响　中合金耐热钢焊缝金属的合金成分原则上按相同于母材的合金成分来设计，其实际成分控制在成分范围的中限，以保证接头的高温持久性能。但合金成分的微量变化可能对焊缝的性能产生重大影响，例如图4.4-31所示出的两种合金系列基本相同，而碳、钼、锰等元素含量略有差别的焊缝金属温度-韧度曲线，从中不难看出，碳含量较高、锰含量较低的9Cr-Mo焊缝金属的常温冲击韧度明显低于碳含量较低、锰含量较高的9Cr-Mo焊缝金属。因此，在中合金耐热钢焊接中，严格控制焊缝金属的合金成分和杂质的含量是至关重要的。



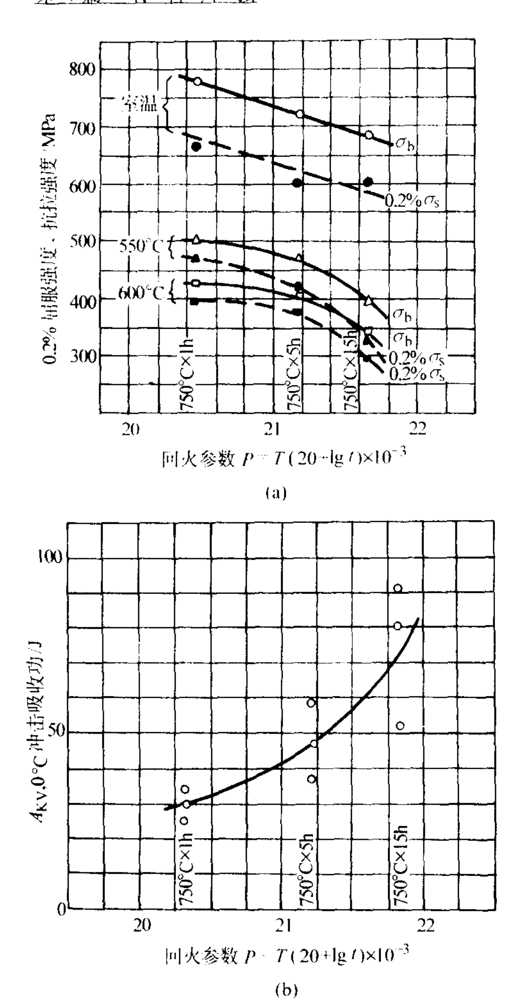
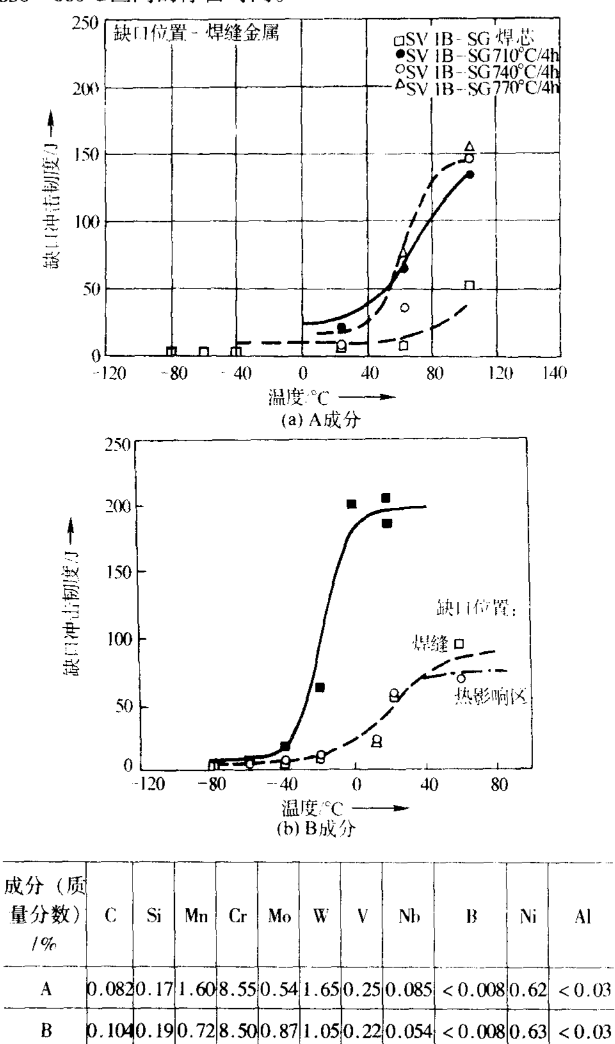


图 4.4-30　焊后热处理回火参数与 9Cr-1MoV 钢接头性能的关系

表 4.4-20　各国压力容器和管道制造法规规定的中合金耐热钢焊后热处理的温度范围及推荐的温度

钢种 \ 法规名称	推荐温度/℃	ANSI B31.3 温度/℃	BS3351 温度/℃	ISO TC11 温度/℃	ASME Ⅷ 温度/℃
5Cr-0.5Mo	720～740	705～760	710～760	670～740	≥677
5CrMoWVTiB	760～780	—	—	—	—
9Cr-1Mo	720～740	705～760	710～760	—	>677
9Cr-1MoV	710～730	—	—	—	—
9Cr-1MoVNb	750～770	—	—	—	—
9Cr-MoWVNb	740～750	—	—	—	—
9Cr-2Mo	710～730	—	—	—	—

2）线能量的影响　中合金耐热钢具有相当高的空淬倾向，焊后状态的焊缝金属和热影响区均为马氏体组织，但焊接线能量对接头的性能仍产生一定的影响。图 4.4-32 示出一种 9Cr-MoWVNb 钢焊条电弧焊接头硬度曲线，其焊接线能量仅 14.4 kJ/cm²，在接头的热影响区出现明显的“硬度谷”，软化区宽度达 2 mm，即使经 740℃/2 h 回火处理仍未消除软化区。值得注意的是，这种软化区对接头的高温持久性能产生不利的影响。图 4.4-33 示出一组等应力持久断裂试验结果，在 24 个焊接接头试样中，只有两个试样断裂于焊缝金属，其余试样均断裂在热影响区，且断裂时间明显短于母材试样。如采用更高的线能量焊接这类中合金钢，则将严重降低接头的高温持久强度。因此，焊接这类中合金耐热钢时，应选择低的焊接线能量，控制焊道厚度，焊前的预热温度和层间温度不宜高于 250℃。尽量缩短焊接接头热影响区在 830～860℃区间的停留时间。



成分（质量分数）/%	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Nb	B	Ni	Al
A	0.082	0.17	1.60	8.55	0.54	1.65	0.25	0.085	<0.008	0.62	<0.03
B	0.104	0.19	0.72	8.50	0.87	1.05	0.22	0.054	<0.008	0.63	<0.03

图 4.4-31　两种不同合金成分的 9Cr-Mo 焊缝金属的缺口韧度、温度、转变曲线

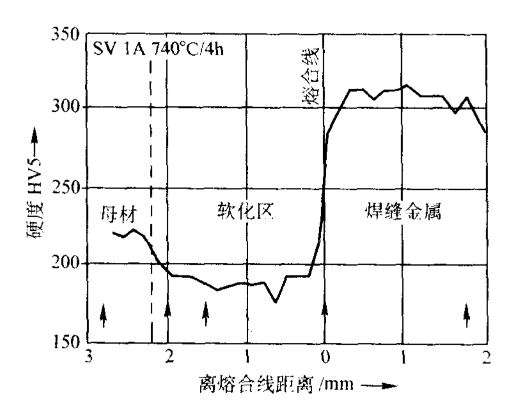


图 4.4-32　9Cr-MoWVNb 钢焊条电弧焊接头横剖面硬度曲线

图 4.4-34 示出 9CrMoVNb 焊接接头 600℃持久强度的试验结果，说明热影响区窄的（2 mm）焊接接头与热影响区宽的（4～5 mm）焊接接头相比，在相同的负载下，断裂时间延长 2～3 倍。

因此对于这类马氏体耐热钢的焊接必须从焊接工艺上控制热输入量，尽量减少热影响区的宽度。这样虽然降低了焊



接效率，但接头的持久强度大幅提高，延长了使用寿命。

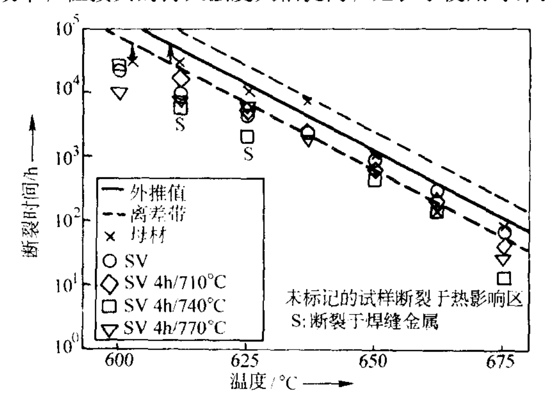


图 4.4-33 9Cr-MoWVNb 钢焊接接头的等应力持久断裂试验结果

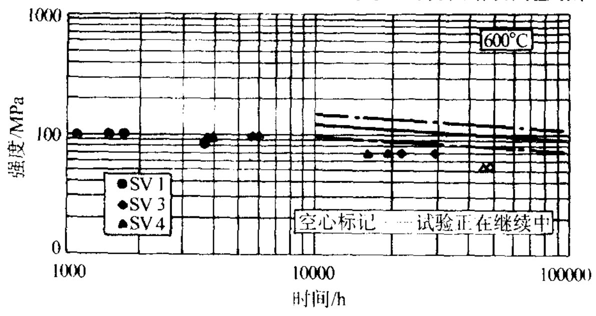


图 4.4-34 三种热影响区宽度不同的焊接接头 600℃持久断裂试验结果

• SV1（ϕ241 mm×9 mm）手工钨极氩弧焊，热影响区宽度 4～5 mm，软化区硬度 HV_{10}175

预热温度大于 180℃，层间温度小于 270℃，焊后热处理 760℃/2 h

◆ SV3（ϕ260 mm×60 mm）焊条电弧焊，热影响区宽度 2 mm，软化区硬度 HV_{10}171

预热温度大于 100℃，层间温度小于 190℃，焊后热处理 760℃/4 h

▲ SV4（ϕ260 mm×32 mm）焊条电弧焊，上坡焊，焊道厚度 4.0 mm 热影响区宽度 4 mm 软化区硬度 HV_{10}195

预热温度大于 100℃，层间温度小于 200℃，焊后热处理 760℃/4 h

3）焊后热处理的影响　焊后热处理的温度和保温时间对接头的冲击韧度和高温持久强度有不可忽视的影响。图 4.4-35 示出焊后热处理温度和保温时间与 9Cr-MoWVNb 钢埋弧焊焊缝金属冲击韧度的关系曲线。总的趋势是，回火温度愈高，冲击韧度愈高。回火温度必须高于 725℃，才能使焊缝金属的冲击韧度达到标准规定的室温 27 J 以上。

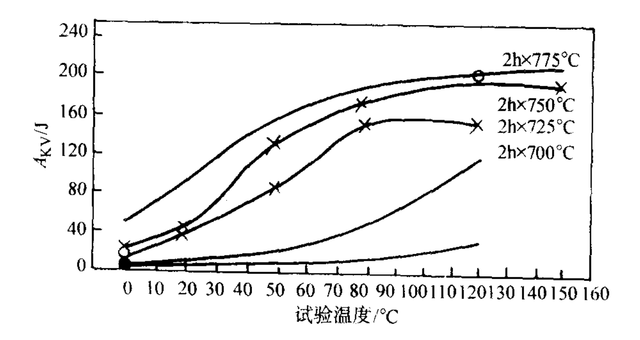


图 4.4-35 焊后热处理参数与 9Cr-MoWVNb 钢埋弧焊焊缝金属冲击韧度的关系曲线

图 4.4-36 示出两种不同成分 9Cr-MoWVNb 钢在不同热处理状态下高温持久强度曲线。由图中数据可见，经 740℃/4 h 的回火处理，由于显微组织出现某种程度的回复现象而降低了高温持久强度，但所有接头试样的持久强度绝对值均在母材持久强度离差带下限以上或紧靠下限值。对于必须保证高温持久强度的焊接部件，如电站锅炉受热面管件，应严格控制回火温度，避免在组织回复区内长时热处理。

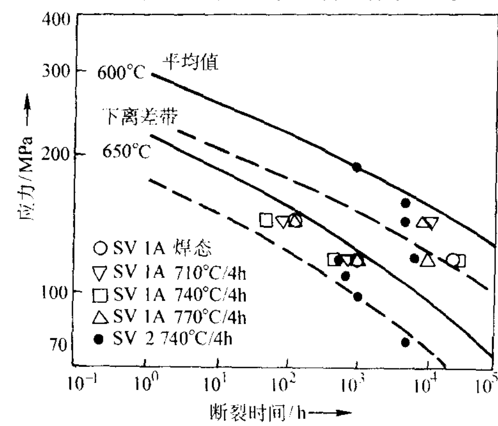


图 4.4-36 两种不同成分的 9Cr-MoWVNb 钢在不同热处理状态下的高温持久强度曲线

（2）中合金耐热钢焊接接头力学性能典型数据

下面以 10Cr5MoWVTiB 和 A213-91（9Cr-1MoV）中铬耐热钢为例，列举选用标准的焊接材料按成熟的焊接工艺焊接的接头力学性能典型数据。

1）10Cr5MoWVTiB 钢管氩弧焊接头的性能　10Cr5MoWVTiB 多元合金耐热钢管供货状态为正火＋回火。原始金相组织为贝氏体。

ϕ42 mm×3.5 mm 钢管对接接头采用低频脉冲钨极填丝氩弧焊。焊接工艺参数见表 4.4-21 注。因管壁厚度小于 6 mm，焊前未作预热，焊后直接空冷。接头经 770℃/30 min 高温回火。其常温和高温短时力学性能以及经 650℃、5 000 h 时效后的抗拉强度列于表 4.4-21。采用高温管爆试验测定接头持久强度，并用最小二乘法推算出 650℃ 10×10^4 h 持久强度为 29.4 MPa。起爆点均在焊缝外的母材上。这说明焊接接头的持久强度不低于母材。

2）A213-91（9Cr-1MoV）钢焊接接头的性能　ASTM A213-91 钢是 9Cr1MoV 型钢的典型钢种之一，厚 50 mm 钢板的焊条电弧焊用 CM-9S 焊条焊接，埋弧焊采用 W-CM9S 焊丝，配用 B-9CM 焊剂。预热和层间温度为 200～250℃。焊条电弧焊焊后热处理参数为 750℃/5 h，埋弧焊接头的热处理参数为 750℃/10 h。

焊条电弧焊和埋弧焊接头其常温和高温短时力学性能数据列于表 4.4-22。焊缝金属及热影响区冲击韧度与 600℃长时时效时间的关系曲线示于图 4.4-37。焊缝金属在 500～600℃温度区间的接头的高温蠕变极限曲线示于图 4.4-38。

由上列数据可见，A213-T91 钢的焊条电弧焊和埋弧焊焊缝金属具有高于母材的常温和高温抗拉强度、足够高的常温缺口冲击韧度，600℃长时时效后，接头冲击韧度变化不大。焊缝金属的高温蠕变极限均在母材高温蠕变极限离差带范围之内。

3.5 中合金耐热钢焊接实例

中合金耐热钢特别是新近开发的 9CrMo 系列钢及其焊接接头由于具有相当高的蠕变极限，已在许多大型动力工程中逐步取代低合金耐热钢厚壁部件，取得可观的经济效益。以下列举 9Cr-MoWVNb 钢和 9Cr-2Mo 钢厚壁焊件对接接头焊条电弧焊和埋弧焊典型产品的焊接工艺规程。详见表 4.4-23 和表 4.4-24。



表 4.4-21　10Cr5MoWVTiB 钢焊接接头的力学性能

试验温度/℃	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	δ/%	ψ/%	断裂部位
常温	—	665	—	—	焊缝外
630	304	343	25	—	焊缝外
650	255	294	17	—	焊缝外
670	235	254	24	—	焊缝外
600℃时效后常温	—	595	—	—	—
母材标准常温强度	≥392	540～735	≥18	≥50	—
焊接工艺参数	$I_{基}$=40～50 A，$I_{峰}$=180 A，焊速 v=90～140 mm/min，焊后热处理：770℃/30 min				

表 4.4-22　A213-T91 钢的焊条电弧焊和埋弧焊接头性能

焊接方法及热处理状态	试验温度/℃	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	收缩率/%	缺口冲击吸收功/J		
						+20℃	0℃	-20℃
焊条电弧焊 750℃/5 h	20	586	706	25	67	74	46	—
	550	409	461	20	79	62	57	—
	600	364	398	22	86	86	36	—
埋弧焊 750℃/10 h	20	571	682	24	72	—	57	84
	550	357	424	19.3	77.5	—	116	52
	600	319	363	25.3	83.7	—	96	18
	650	226	296	38.7	91	—	—	—
埋弧焊 750℃/10 h 600℃/5 000 h	20	543	660	21.5	70.2	—	75	—
	550	333	408	19.6	77.8	—	—	—
	600	253	344	25.2	83.0	—	—	—
	650	163	270	39.0	90.4	—	—	—
母材标准强度	20	≥414	≥586	≥20	≥50	—	—	—

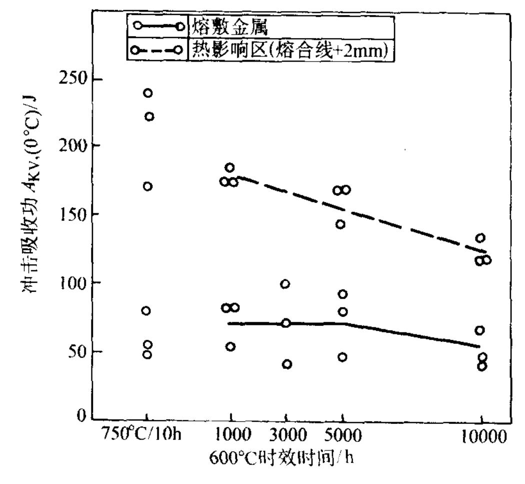


图 4.4-37　A213-T91 钢接头的缺口冲击韧度与600℃长时时效时间的关系

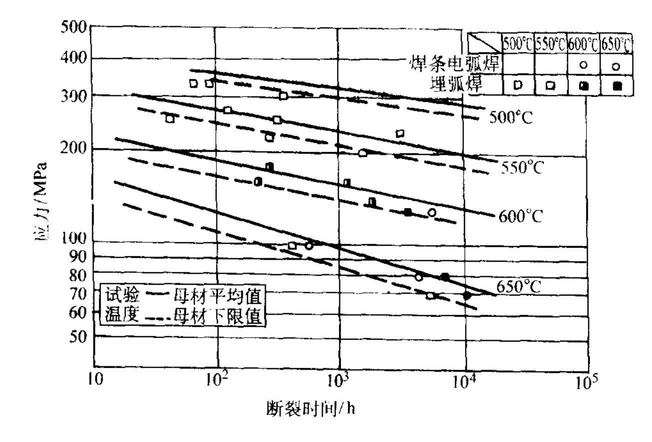


图 4.4-38　A213-T91 钢焊缝金属的高温蠕变极限曲线

表 4.4-23　9Cr-MoWVNb 钢对接环缝焊条电弧焊焊接工艺规程（实例）

母材	牌号	NF616	焊接材料	牌号	Niffefsu N616
	规格	40 mm		规格	ϕ3.25 mm
坡口形式及尺寸/mm	8°$^{+2°}_{0}$；40；R4；2^{+1}_{0}		焊接方法	封底层焊道：手工氩弧焊 填充丝：ϕ2.0 mm 牌号：Niffefsu YT616 填充和盖面层：焊条电弧焊 连续焊	
焊接温度参数	预热温度/℃	230～250	焊后热处理	740℃/4 h	消氢处理 250℃/2 h

续表 4.4-23

母材	牌号	NF616	焊接材料	牌号	Niffefsu N616							
	规格	40 mm		规格	ϕ3.25 mm							
焊接工艺参数	焊接电流：手工氩弧焊 135 A 电弧电压：手工氩弧焊：12 V 焊接速度：120 mm/min				焊条电弧焊：120 ~ 140 A 焊条电弧焊：24 V 焊接线能量 q = 144 kJ/cm							
焊后冷却制度	消氢处理后缓冷至室温，1 h 后立即焊后热处理											
焊缝金属化学成分（质量分数）/%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	V	Nb	B	Ni
	0.085	0.33	1.60	0.006	0.001	8.5	0.54	1.6	0.24	0.086	<0.008	0.65

表 4.4-24 9Cr-2Mo 钢埋弧焊工艺规程（实例）

母材	牌号	HCM-9M	焊接材料	焊剂	BL-9M
	规格	82 mm		焊丝	W-CM9Mϕ4.0 mm
坡口形式及尺寸/mm	10°　15°　82　R8 $^{+1}_{0}$　3 $^{+1}_{0}$			焊接顺序及焊接方法	封底层焊道：手工氩弧焊 加厚焊道：焊条电弧焊 填充和盖面层：埋弧焊
预热和层间温度	200 ~ 250℃			焊后消氢处理	250℃/3 h
焊接工艺参数	层次	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min⁻¹	线能量/kJ·cm⁻¹
	1	135	12		
	2 ~ 3	140	24	约 150	
	4 ~ 25	500	28 ~ 30	约 300	30
	26 ~ 28	500	28 ~ 30	约 250	35
焊后冷却制度	消氢处理后缓冷至 100℃，保持 50 min，紧接作焊后热处理				
焊后热处理温度	715℃/10 h				

4 高合金耐热钢的焊接

4.1 高合金耐热钢的化学成分和力学性能

根据现行高合金耐热钢国家标准，按其组织特征可分为奥氏体型、铁素体型、马氏体型和弥散硬化型四类。按其基本合金系统，可分为两类，即铬镍型和高铬型。为提高这些耐热钢的抗氧化性、热强性并改善其工艺性，这两种基本合金系统中，还分别加入 Ti、Nb、Al、W、V、Mo、B、Si、Mn 和 Cu 等合金元素。

（1）合金元素对高合金耐热钢力学性能的影响

在铬镍型奥氏体耐热钢中，铬提高了钢在氧化环境中的热强性，其作用是通过 γ-固溶体强化，但强化程度低于钼和钒。铬也是碳化物形成元素，因碳化铬的耐热性较低，其强化效果不明显。

碳是一种强烈的奥氏体形成元素，碳含量只增加万分之几就可抵销 18-8 型奥氏体中铁素体形成元素的作用。碳和氮共同提高奥氏体钢的热强性。氮的强化作用在于时效过程中形成氮化物和碳氮化物相。

硅和铝能提高奥氏体钢的抗氧化性。在 18-8 型 Cr-Ni 钢中，硅含量从 0.4%提高到 2.4%，钢在 980℃下的抗氧化性可提高 20 倍，但硅会严重恶化稳定型奥氏体钢的焊接性。铝对 Cr-Ni 型奥氏体热强性的强化作用不大。在弥散硬化高合金钢中，增加铝含量可提高室温和高温强度。

钛和铌的行为有较大差别。在镍含量较低的奥氏体钢中，钛与碳结合成稳定的碳化物。加入少量的钛可提高钢的持久强度。铌与碳形成最难熔的碳化物之一（NbC），当铌含量增加到 0.5% ~ 2.0%时可提高奥氏体耐热钢的热强性，同时也改善钢的持久塑性。但铌可能促使碳含量较低的奥氏体形成近缝区液化裂纹和焊缝金属的热裂纹。

钼提高了奥氏体耐热钢的热强性，其强化作用在于稳定了 γ-固溶体和对晶界的强化。钼也改善了奥氏体钢的短时塑性和长时塑性，对焊接性产生一定的有利影响。在弥散硬化钢中，钼作为弥散强化元素，其作用最强烈。钼的不利作用是降低了奥氏体钢的冲击韧度。

钨在很多方面类似于钼。钨单独加入时，只是强化了 γ-固溶体，不会使钢的热强性明显提高。不过它与其他元素共同加入奥氏体钢时，可能引起固溶体的弥散硬化。在这种情况下，钨提高了钢的热强性，但降低奥氏体钢的韧度。

在 Cr-Ni 型奥氏体钢中，钒提高热强性的作用不大。在氧化性介质中，钒可能降低钢的抗高温氧化性。但在 13%Cr 钢中，V 和 Mo、W、Nb 等元素一样，可提高钢的热强性。

硼以微量成分加入奥氏体钢时，提高了钢的热强性。例如在 Cr14Ni18W2Nb 型奥氏体钢中，硼含量从 0.005%增加到 0.015%时，钢的 650℃高温持久强度从 118 MPa 提高到 176 MPa。

在高合金铬镍钢中，加入 Cu、Al、Ti、B、Nb、N、P 等元素可促使钢产生弥散硬化，从而提高钢的热强性。

（2）合金元素对高合金耐热钢组织的影响

在高合金钢中，合金元素按其对钢组织结构和组织转变特性的影响可分成下列两组：一组是缩小奥氏体区的元素，其中包括 Si、Cr、W、Mo、Ti、V 和 Al 等；另一组是扩大奥氏体区的元素，有 Mn、Ni、Co、Cu 和 N 等。第一组元素使铁的 α/γ 转变点移向较高温度，并使 γ/δ 转变点移向较低温度（参见图 4.4-39），结果使奥氏体区缩小。在合金元素的极限浓度下（Cr15%、W8%或 Mo3%、Si1.5%），A_3 点与



A_4 点重合，即 γ 区收缩，而 α 区连续地变为 δ 区。当这些合金元素浓度较高时，即处于阴影区的右边，从低温到熔点均为纯铁素体。合金元素的临界浓度取决于碳含量。在碳含量近似为0%的Fe-Cr二元合金中，铬含量超过15%即形成铁素体钢，而当碳含量为0.25%和0.4%时，临界铬含量相应提高到24%和29%。

在图4.4-39的阴影线区内侧形成半铁素体钢。这种钢内一部分组织由不可转变的铁素体组成，而在较高温度下存在的奥氏体按不同的冷却速度，可转变为珠光体、贝氏体或马氏体。因此，在含碳0.10%的Cr13%钢中，在高温下的组织由奥氏体+ δ 铁素体组成。如钢从1 100℃缓慢冷却，则奥氏体转变为珠光体，而 δ 铁素体不发生转变。从相同的高温油冷后，组织则由镶嵌 δ 铁素体的马氏体组成。在另一些半铁素体钢中，奥氏体在缓慢冷却时不转变为珠光体。这些钢的组织在所有温度下均由 δ 铁素体和奥氏体组成，即形成了铁素体-奥氏体双相钢。

在图4.4-39的阴影区右边，则形成马氏体组织，如碳含量大于0.15%、铬含量为13%～18%的铬钢。

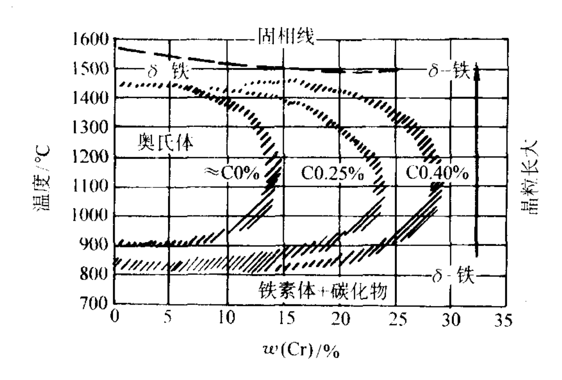


图4.4-39　Fe-Cr系合金在不同碳含量下的状态图

第二组元素使铁的 γ/α 转变点移向较低温度，并使 γ/δ 转变点移向较高温度，由此扩大了奥氏体区，缩小了 α 和 δ 区。当Ni含量超过30%或Mn含量达到14%的极限浓度时，A_3 点一直下降到室温。这种钢从室温到接近熔点均为奥氏体组织。

当钢中存在多种元素时，其作用不是简单的叠加。这些元素可能互相强化，也可能引起新的作用。如在Cr-Ni钢中，铁素体形成元素Cr和奥氏体形成元素Ni共存，其作用不是互相抵销，而是Cr加强了Ni的作用。例如，在Cr18%～19%，Ni8%～12%的合金成分下，钢已具有纯奥氏体组织。

在铸态的焊缝金属中，例如Cr18%和Ni8%的铬镍钢焊缝金属则含有一定量的铁素体。这些铁素体晶体在缓慢冷却时可能富集铁素体形成元素。由于扩散速度随温度下降而减慢，在相继的 γ 结晶中不再达到完全的浓度平衡，也就不再符合平衡关系。当冷却到室温时富集大量铁素体形成元素的区域仍为铁素体组织，而形成所谓亚稳奥氏体钢。

在高合金耐热钢中，各种合金元素对钢组织结构和各种性能影响的程度综列于表4.4-25。

(3) 高合金耐热钢标准化学成分和力学性能

我国和世界主要工业国常用的奥氏体型、铁素体型和马氏体型高合金耐热钢的标准化学成分列于表4.4-26。弥散硬化高合金耐热钢的标准化学成分列于表4.4-27。这些钢在供货状态下的力学性能分别列于表4.4-28～表4.4-30。为适应现代电站锅炉向超临界和特超临界参数发展，世界工业发达国家如美德日等国近期已研制出一系列新型马氏体型和奥氏体型高合金耐热钢，其钢号详见表4.4-26附注。

表4.4-25　合金元素对高合金耐热钢性能和组织的影响

合金元素	对组织结构的影响			对性能的影响				
	形成铁素体	形成奥氏体	形成碳化物	提高耐蚀性	提高抗氧化性	提高高温强度	增强时效硬化	细化晶粒
Al	■				■		■	□
C		■	□			□		
Cr	□		□	■	■	□		
Co						■		
Nb	□		■	□		■		□
Cu				□			□	
Mn		△				□		
Mo	□		△	□		□		
Ni		□		■	□	□		
N		■				□		■
Si	□			□	■		□	
Ta	□		□			□	□	□
Ti	■		■		□	□	□	■
W	△		□			□		■
V	△		□			□		□

注：■强烈　□中等　△微弱。

高合金耐热钢最主要的特征是在600℃以上温度具有较高的力学性能和抗氧化性能。表4.4-31列出某些典型的高合金耐热钢600℃温度以上高温力学性能数据。表4.4-32列出几种奥氏体耐热钢在不同温度下的蠕变极限值。

高合金耐热钢的抗氧化性是以失重率来表示的。如在一确定的温度下失重不超过1 g/ $(m^2 \cdot h)$，则这种钢可认为是抗氧化的。图4.4-40示出18-8、25-13和25-20铬镍奥氏体耐热钢在600℃温度以上高温下的抗氧化性实测数据。由图示曲线可见，18-8型铬镍奥氏体钢抗氧化极限温度是850℃，25-13型铬镍钢抗氧化温度为1 000℃，而25-20型铬镍钢的抗氧化温度可达1 200℃。

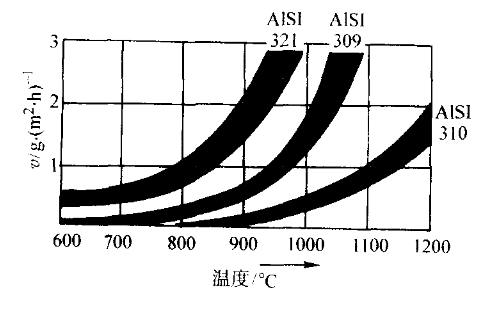


图4.4-40　18-8Ti、25-13和25-20型铬镍奥氏体钢在高温气氛中的失重与温度的关系曲线

(4) 高合金耐热钢的热处理状态

各种高合金耐热钢以不同的热处理状态供货。奥氏体耐热钢极大部分以固溶处理状态供货，而铁素体型和马氏体型耐热钢的供货状态为退火处理。弥散硬化型耐热钢则以固溶处理+时效处理状态供货。各种类型高合金耐热钢的热处理制度分别列于表4.4-33～表4.4-35。应当指出，为使各种高合金耐热钢具有合乎要求的常温和高温性能，选用正确的热处理制度是十分重要的。

(5) 高合金耐热钢的应用范围

由上列数据可见，高合金耐热钢具有相当好的综合性能，目前已在各个不同工程领域内得到广泛的应用。按照高合金耐热钢焊接结构服役期的长短，可将其分为短期、中期和长期三类。

涡轮泵和火箭发动机部件的工作时间仅为几分钟，属于短期服役焊接结构。航空发动机和涡轮发动机转子的工作时



间达几百或几千小时，属于第二类焊接结构。第三类是电站锅炉高温高压部件、汽轮机转子和壳体等，其工作期限长达10万小时，甚至20万小时。各种高合金耐热钢适用的温度范围及其主要应用领域综列于表4.4-36。

表 4.4-26　高合金耐热钢的标准化学成分（摘自 GB 4238—1992）

钢号	奥氏体型 化学成分（质量分数）/%								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	其他
0Cr18Ni9	≤0.07	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	17.0~19.0	8.0~11.0	—	—
1Cr18Ni9Ti	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	17.0~19.0	8.0~11.0	—	Ti≥5×(C%-0.02)~0.80
0Cr18Ni10Ti	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	17.0~19.0	9.0~12.0	—	Ti≥5×C%
0Cr18Ni11Nb	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	17.0~19.0	9.0~13.0	—	Nb≥10×C%
1Cr18Ni9Si3	≤0.15	2.0~3.0	≤2.00	≤0.035	≤0.030	17.0~19.0	8.0~10.0	—	—
0Cr18Ni13Si4	≤0.08	3.00~5.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	15.0~20.0	11.5~15.0	—	—
1Cr20Ni14Si2	≤0.20	1.50~2.50	≤1.50	≤0.035	≤0.030	19.0~22.0	12.0~15.0	—	—
1Cr25Ni20Si2	≤0.20	1.50~2.50	≤1.50	≤0.035	≤0.030	24.0~27.0	18.0~21.0	—	—
0Cr17Ni12Mo2	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	16.0~18.0	10.0~14.0	2.0~3.0	—
0Cr19Ni13Mo2	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	18.0~20.0	11.0~15.0	3.0~4.0	—
2Cr25Ni13	≤0.20	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	22.0~24.0	12.0~15.0	—	—
0Cr23Ni13	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	22.0~24.0	12.0~15.0	—	—
2Cr25Ni20	≤0.25	≤1.50	≤2.00	≤0.035	≤0.030	24.0~26.0	19.0~22.0	—	—
0Cr25Ni20	≤0.08	≤1.50	≤2.00	≤0.035	≤0.030	24.0~26.0	19.0~22.0	—	—
1Cr16Ni35	≤0.15	≤1.50	≤2.00	≤0.035	≤0.030	14.0~17.0	33.0~37.0	—	—
钢号	铁素体型 化学成分（质量分数）/%								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	其他
0Cr11Ti	≤0.08	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	10.50~11.75	—	—	Ti：6×C%~0.75
00Cr12	≤0.03	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	11.0~13.0	—	—	—
0Cr13Al	≤0.08	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	11.5~14.5	0.10~0.30	—	—
1Cr17	≤0.12	≤0.75	≤1.00	≤0.035	≤0.030	16.0~18.0	—	—	—
1Cr19Al3	≤0.10	≤1.50	≤1.00	≤0.035	≤0.030	17.0~21.0	2.0~4.0	—	—
2Cr25N	≤0.20	≤1.00	≤1.50	≤0.035	≤0.030	23.0~27.0	—	≤0.25	—
AISI 442	≤0.20	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	18.0~23.0	—	—	—
X10CrSi18（DIN）	≤0.12	1.90~2.40	≤1.00	≤0.045	≤0.030	17.0~19.0	—	—	—
X10CrAl18（DIN）	≤0.12	1.0~1.5	≤1.00	≤0.045	≤0.030	17.0~19.0	0.70~1.20	—	—
X10CrAl24（DIN）	≤0.12	1.0~1.5	≤1.00	≤0.045	≤0.030	23.0~25.0	1.20~1.70	—	—
X18CrN28（DIN）	0.15~0.20	≤0.10	≤1.00	≤0.040	≤0.030	26.0~29.0	—	0.15~0.25	—
钢号	马氏体型 化学成分（质量分数）/%								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	其他
1Cr12	≤0.15	≤0.50	≤1.00	≤0.035	≤0.030	11.5~13.0	—	—	—
1Cr13	≤0.15	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	11.5~13.5	—	—	—
AISI 414	≤0.15	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	11.5~13.5	1.25~2.50	—	—
AISI 431	≤0.20	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	15.0~17.0	1.25~2.50	—	—
AISI 422	0.20~0.25	≤0.75	≤1.00	≤0.025	≤0.025	11.0~13.0	0.50~1.0	0.75~1.25	W 0.75~1.25 V 0.15~0.30
X20CrMoV12-1	0.17~0.23	≤0.50	≤1.00	≤0.030	≤0.030	10.0~12.5	0.30~0.80	0.80~1.20	V0.25~0.35

注：1. AISI 美国钢铁学会，DIN 德国工业标准。

2. 新型马氏体高合金耐热钢钢号有：12Cr-1MoWV（DINX20CrMoWV121），12Cr-1Mo-1WVNb（HCM12，SUS410 J2TB），12Cr-0.5Mo-1.8WVNb（TB12），12Cr-0.5Mo-2WCuVNb（HCM12A，ASME T122，SUS410 J3TB），12Cr-WCo-NiVNb（NF12），12Cr-WCo-VNb（SAVE12）

3. 新型奥氏体高合金耐热钢钢号有：18Cr-8NiNbTi（SUS321 JIHTB），18Cr8NiCuNbN（SUS304 JIHTB），25Cr-20NiNbN（SUS310 JIHTB），20Cr-25NiMoNbTi（NF709，SUS J2HTB），22Cr-15NiNbN（SUS309J4HTB），23Cr-18NiCuWNbN（SAVE25），21Cr-32NiTiAl（Alloy 800H），27Cr-32NiCeNb（AC66）



表 4.4-27 弥散硬化高合金耐热钢标准化学成分（摘自 GB 4238—1992）

钢号	化学成分（质量分数）/%									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Al	其他
1Cr17Ni7Al	≤0.09	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	6.50~7.75	16.0~18.0	≤0.50	0.75~1.5	—
1Cr15Ni25Ti2Mo AlVB	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	24.0~27.0	13.0~16.0	Mo 1.0~1.50	≤0.35	V 0.15~0.50 Ti 1.90~2.35 B 0.001~0.010
1Cr22Ni20Co20Mo3W3NbN	0.08~0.16	≤1.00	1.00~2.00	≤0.035	≤0.030	19.0~21.0	20.0~22.0	Mo 2.5~3.0	W 2.0~3.0	N 0.10~0.20 B 0.001~0.010 Nb 0.75~1.25 Co18.5~21.0
X15HЮ①	≤0.09	≤0.80	≤0.80	≤0.035	≤0.030	7.0~9.4	14.0~16.0	—	0.70~1.30	—
X17H5M3①	0.06~0.10	≤0.70	≤0.70	≤0.035	≤0.030	4.5~5.5	16.0~17.5	—	—	Mo 3.0~3.5
X15H7M2Ю①	0.05~0.10	≤0.70	≤0.70	≤0.030	≤0.020	7.0~8.5	14.2~15.2	—	1.20~1.80	Mo 1.6~2.4
S17400②（17-4PH）	≤0.07	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	3.0~5.0	15.5~17.5	3.0~5.0	—	Nb 0.15~0.45
S15500②（15-5PH）	≤0.07	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	3.5~5.5	14.0~15.5	2.50~4.50	—	Nb 0.15~0.45
S13800②（13-8MoPH）	≤0.05	≤0.10	≤0.20	≤0.010	≤0.008	7.5~8.5	12.25~13.25	—	0.90~1.35	Mo 2.0~2.50 N ≤0.01
S14800②（14-8MoPH）	≤0.05	≤1.00	≤1.00	≤0.015	≤0.010	7.75~8.75	13.75~15.0	—	0.75~1.50	Mo 2.0~3.0
S35000②（AM-350）	0.07~0.11	≤0.50	0.50~1.25	≤0.040	≤0.030	4.0~5.0	16.0~17.0	—	—	Mo 2.5~3.25 N 0.07~0.13
S35500②（AM-355）	0.10~0.15	≤0.50	0.50~1.25	≤0.040	≤0.030	4.0~5.0	15.0~16.0	—	—	Mo 2.5~3.25 N 0.07~0.13
K66286②（A268）	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	24.0~27.0	13.5~16.0	—	≤0.35	Mo 1.0~1.50 V 0.10~0.50 Ti 1.9~2.35 B 0.001~0.010

① 原苏联 ГОСТ 标准钢号；
② 美国 UNS 系统钢号。

表 4.4-28 奥氏体型高合金耐热钢的标准力学性能（摘自 GB 4238—1992）

钢号	热处理状态	强度性能			硬度	
		屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	HB	HRB
0Cr18Ni9	固溶处理	≥205	≥520	≥40	≤187	≤90
1Cr18Ni9Ti	固溶处理	≥205	≥520	≥40	≤187	≤90
0Cr18Ni10Ti	固溶处理	≥205	≥520	≥40	≤187	≤90
0Cr18Ni11Nb	固溶处理	≥205	≥520	≥40	≤187	≤90
1Cr18Ni9Si3	固溶处理	≥205	≥520	≥40	≤207	≤95
0Cr18Ni13Si4	固溶处理	≥205	≥520	≥40	≤207	≤95
1Cr20Ni14Si2	固溶处理	—	≥590	≥40	—	—
1Cr25Ni20Si2	固溶处理	—	≥540	≥35	—	—
0Cr17Ni12Mo2	固溶处理	≥205	≥520	≥40	≤187	≤90
0Cr19Ni13Mo3	固溶处理	≥205	≥520	≥40	≤187	≤90
2Cr23Ni13	固溶处理	≥205	≥560	≥40	≤201	≤95
0Cr23Ni13	固溶处理	≥205	≥520	≥40	≤187	≤90
2Cr25Ni20	固溶处理	≥205	≥590	≥35	≤201	≤95
0Cr25Ni20	固溶处理	≥205	≥520	≥40	≤187	≤90
1Cr16Ni35	固溶处理	≥205	≥560	≥35	≤201	≤95



表 4.4-29 铁素体型和马氏体型耐热钢的标准力学性能（摘自 GB 4238—1992）

钢号		热处理状态	强度性能			硬度		冷弯	
			屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	HB	HRB	弯曲角	弯芯直径
0Cr11Ti		退火处理	≥175	≥365	≥22	≤162	≤80	180°	$a<8$ mm $d=a$ $a\geq 8$ mm $d=2a$
00Cr12		退火处理	≥195	≥365	≥22	≤183	≤88	180°	$d=2a$
0Cr13Al		退火处理	≥175	≥410	≥20	≤183	≤88	180°	$a<8$ mm $d=a$ $a\geq 8$ mm $d=2a$
1Cr17		退火处理	≥205	≥450	≥22	≤183	≤88	180°	$d=2a$
1Cr19Al3		退火处理	≥245	≥440	≥15	≤210	≤95	—	—
2Cr25N		退火处理	≥275	≥510	≥20	≤210	≤95	135°	$a<8$ mm $d=a$ $a\geq 8$ mm $d=2a$
AISI 442		退火处理	≥275	≥515	≥20	≤217	≤95	——	—
X10CrSi18	(DIN)	退火处理	≥345	540 ~ 690	≥15	—	—	—	—
X10CrAl18	(DIN)	退火处理	≥295	490 ~ 640	≥12	—	—	—	—
X10CrAl24	(DIN)	退火处理	≥295	490 ~ 640	≥10	—	—	—	—
1Cr12		退火处理	≥205	≥440	≥20	≤200	≤93	180°	$d=2a$
1Cr13		退火处理	≥205	≥440	≥20	≤200	≤93	180°	$d=2a$
AISI 414		退火处理	≥276	≥483	≥20	—	—	—	—
AISI 431		调质处理	≥655	≥860	≥20	—	—	—	—
AISI 422		退火处理	≥275	≥515	≥20	≤217	≤95	—	—
X20CrMoV12-1		退火处理	≥490	686 ~ 833	≥17	—	—	—	—

注：X20CrMoV12-1 要求常温 A_{kV}。

表 4.4-30 弥散硬化耐热钢的标准力学性能（摘自 GB 4238—1992）

钢号	热处理状态	强度性能			硬度			
		屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	HB	HRB	HRc	HV
0Cr17Ni7Al	固溶 + 565℃时效	≥960	≥1 140	$S\leq 3.0$ mm ≥3.0 $S>3.0$ mm ≥5.0	—	—	≥35	≥345
0Cr17Ni7Al	固溶 + 510℃时效	≥1 030	≥1 230	$S>3.0$ mm ≥4.0	—	—	≥40	≥392
0Cr15Ni25TiMoAlVB	固溶 + 时效	≥590	≥900	≥15	≥248	≥101	—	≥261
1Cr22Ni20Co20Mo3W3NbN	固溶 + 时效	≥343	≥755	≥30	≥192	≥91	≥20	—
X15H9IO	正火 + 时效	≥1 029	≥1 274	—	—	—	—	—
X17H5M3	正火 + 时效	≥882	≥1 176	≥10	—	—	—	—
X16H7M2IO	正火 + 时效	≥1 274	≥1 470	—	—	—	—	—
S17400 (17-4PH)	固溶 + 550℃时效	≥1 000	≥1 069	≥12	≥331	—	≥35	—
S15500 (15-5PH)	固溶 + 550℃时效	≥1 000	≥1 070	≥12	≥331	—	≥35	—
S13800 (13-8MoPH)	固溶 + 510℃时效	≥1 415	≥1 515	≥10	≥430	—	≥45	—
S35000 (AM-350)	低温处理 + 时效	≥1 192	≥1 419	≥15	—	—	≥45	—
K66286 (A-286)	固溶 + 时效	≥588	≥892	≥15	≥248	—	—	—

表 4.4-31　高合金耐热钢短时高温力学性能示例

钢　号	温度/℃	不同温度下的力学性能				
		屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	δ/%	ψ/%	a_k/J·cm^{-2}
1Cr18Ni9Ti	20	235	559	69	79	274
	600	176	363	31	62	294
	650	127	353	34	65	284
	700	127	353	20	58	313
1Cr14Ni18W2NbB	20	215	510	53	68	176 ~ 206
	650	137	363	34	66	255
	700	127	323	36	65	255
1Cr25Ni16Mn7Nb	20	—	784 ~ 921	47 ~ 57	—	363 ~ 372
	700	—	392 ~ 431	14 ~ 18	—	314 ~ 343
	880	—	294 ~ 333	15 ~ 20	—	284 ~ 314
	900	—	186 ~ 225	22 ~ 32	—	235 ~ 284
	1 000	—	98 ~ 127	32 ~ 50	—	167 ~ 255
	1 100	—	39 ~ 59	25 ~ 50	—	167 ~ 216
	1 200	—	29 ~ 39	24 ~ 60	—	88 ~ 118
1Cr25Ni25TiB	20	294 ~ 343	539 ~ 637	35 ~ 45	50 ~ 65	245
	800	—	225 ~ 333	50 ~ 60	55 ~ 65	235
	900	—	108 ~ 137	70 ~ 75	55 ~ 60	225
	1 000	—	29 ~ 59	70 ~ 75	60 ~ 65	225
1Cr10Ni20Ti2Mo	20	637 ~ 735	882 ~ 1029	8 ~ 20	10 ~ 20	29 ~ 69
	700	578	695	10	15	—
	750	510	608	8	13	—
	800	382	451	17	36	—
1Cr15Ni25W5Ti2B	20	412 ~ 539	735 ~ 882	20 ~ 30	30 ~ 50	118 ~ 176
	650	392 ~ 490	637 ~ 686	25 ~ 35	33 ~ 45	98 ~ 147
	700	392 ~ 441	588 ~ 637	15 ~ 20	35 ~ 40	98 ~ 147
	750	372 ~ 441	490 ~ 539	15 ~ 20	25 ~ 35	98 ~ 167

表 4.4-32　奥氏体耐热钢在不同温度下的蠕变极限（100 000 h）示例

温度/℃	钢　号			温度/℃	钢　号		
	0Cr19Ni9 /MPa	0Cr17Ni12Mo2 /MPa	0Cr25Ni20 /MPa		0Cr19Ni9 /MPa	0Cr17Ni12Mo2 /MPa	0Cr25Ni20 /MPa
500	234	284	216	700	39	83	37
550	167	219	149	750	29	54	25
600	110	167	98	800	19.6	29.4	14.7
650	64	123	59	850	14.7	17.6	9.8

表 4.4-33　奥氏体耐热钢的热处理参数

钢　号	供货热处理状态		
	种　类	热处理温度 /℃	冷却方式
0Cr19Ni9 1Cr18Ni9Si3 0Cr17Ni12Mo2 0Cr19Ni13Mo3 0Cr18Ni13Si4	固溶处理	1 010 ~ 1 150	水冷
1Cr18Ni9Ti	固溶处理	920 ~ 1 150	水冷
0Cr25Ni20 2Cr25Ni20 1Cr16Ni35	固溶处理	1 030 ~ 1 180	水冷
1Cr20Ni14Si2 1Cr25Ni20Si2	固溶处理	1 080 ~ 1 130	水冷
0Cr18Ni10Ti 0Cr18Ni11Nb	固溶处理	980 ~ 1 150	水冷
0Cr23Ni13 2Cr23Ni13	固溶处理	1 030 ~ 1 150	水冷



10

表 4.4-34　铁素体和马氏体耐热钢的热处理参数

钢　　号	供货热处理状态		
	种　　类	热处理温度/℃	冷却方式
0Cr11Ti	退火处理	780 ~ 850	快冷或缓冷
00Cr12	退火处理	700 ~ 820	快冷或缓冷
0Cr13Al	退火处理	780 ~ 830	快冷或缓冷
1Cr17	退火处理	780 ~ 850	快冷或缓冷
1Cr19Al3	退火处理	780 ~ 950	快冷或缓冷
2Cr25N	退火处理	780 ~ 880	快冷
AISI 442	退火处理	704 ~ 843	快冷或缓冷
1Cr12 1Cr13	退火处理	~ 750 800 ~ 900	快冷 缓冷
X20CrMoV121	正火 + 回火	1 050℃正火 + 760℃回火	空冷、缓冷
AISI 414	退火处理 调质处理	650 ~ 705 982 ~ 1030 704 ~ 705	水冷 水冷 空冷

表 4.4-35　弥散硬化高合金耐热钢的热处理参数

钢　　号	固 溶 处 理		时 效 处 理		
	温度/℃	冷却介质	温度/℃	时间/h	冷却方式
1Cr17Ni7Al	1 000 ~ 1 100	水	760 ± 15 565 ± 10	1.5 1.5	快冷 空冷
0Cr15Ni25Ti2MoAlVB	885 ~ 915 965 ~ 995	快冷	700 ~ 760	16	空冷或缓冷
1Cr22Ni20Co20Mo3W3NbN	1 130 ~ 1 200	快冷	780 ~ 830	4	空冷或缓冷
X15H9IO X15H7M2IO	900 ~ 950	空冷 + －70℃低温处理	500	1	空冷
X17H5M3	950	空冷 + -70℃低温处理	450	1	空冷
S17400 (17 – 4PH)	1 038	油冷或空冷	482 或 496 ~ 620	1 4	空冷 空冷
S15500 (15 – 5PH)	1 038	水冷	482 552 ~ 620	1 4	空冷 空冷
S35000 AM – 350	932	空冷加 – 70℃低温处理	454	3	空冷
K66286 (A286)	982	油冷	718	16	空冷

表 4.4-36　高合金耐热钢的适用温度范围及其主要用途

钢　种	钢　　号	适用温度范围及其主要用途
马氏体型	1Cr12	抗氧化温度 600 ~ 700℃，汽轮机叶片、喷嘴、锅炉、燃烧器、阀门
	1Cr13	抗氧化温度 700 ~ 800℃，用途同上
	X20CrMoV12-1	抗氧化温度 600 ~ 650℃，超高压锅炉受热面管、集箱、蒸汽管道
铁素体型	0Cr11Ti	抗氧化温度 700 ~ 800℃，锅炉燃烧器壳体、喷嘴
	00Cr12	抗氧化温度 600 ~ 700℃，高温高压阀体、燃烧器
	0Cr13Al	适用温度范围 700 ~ 800℃，燃汽轮机、压缩机叶片
	1Cr17	在 900℃温度以下抗氧化，炉用高温部件、喷嘴
	1Cr19Al3	抗氧化温度 800 ~ 1 000℃，炉用部件、反应器
	2Cr25N	抗氧化温度 1 080℃，燃烧器、高温部件、炉用高温部件



续表 4.4-36

钢　种	钢　号	适用温度范围及其主要用途
奥氏体型	0Cr19Ni9 1Cr18Ni9Ti	抗氧化温度870℃以下，锅炉受热面管子、加热炉零件 热交换器、马弗炉、转炉、喷管
	0Cr18Ni11Ti 0Cr18Ni11Nb	抗高温腐蚀，抗氧化温度范围400～900℃ 工作温度850℃以下的管件
	0Cr18Ni13Si4 1Cr20Ni14Si2	抗高温氧化温度范围1 035℃以下 工作温度1 000～1 050℃的电介和高温分解装置管件 渗碳马弗炉、锅炉吊挂支撑、工作温度650～700℃的超高压蒸汽管道
	0Cr23Ni13	抗氧化温度直到980℃，燃烧器火管、汽轮叶片、加热炉体、甲烷变换装置、高温分解装置
	0Cr25Ni20	抗氧化温度直到1 035℃，加热炉部件，工作温度950℃以下的输汽系统管件
	0Cr17Ni12Mo2 0Cr19Ni13Mo3	抗氧化温度不低于870℃，工作温度600～750℃的化工、炼油热交换器管件，炉用管件
弥散硬化性	0Cr17Ni7Al	工作温度550℃以下的高温承载部件
	0Cr15Ni25Ti2MoAlVB 0Cr12Ni20Ti3AlB	抗氧化温度700℃，工作温度700℃以下的汽轮机转子叶轮、叶片、轮环
	1Cr22Ni20Co20Mo3W3NbN 1Cr12Ni22Ti3MoBAl	工作温度750℃以下的汽轮机转子，压缩机零件、叶片、叶轮

4.2　高合金耐热钢的焊接特性

高合金耐热钢与中低合金耐热钢相比，具有独特的物理性能。表4.4-37列出马氏体、铁素体、奥氏体和弥散硬化型高合金耐热钢的典型物理性能数据。为便于对照，亦列出了普通低碳钢的相应数据。对焊接性产生较大影响的物理性能有热膨胀系数、热导率和电阻。由表中数据可见，与碳钢相比，奥氏体耐热钢的热膨胀系数较高，将引起较大的变形。而各种高合金耐热钢的热导率均较低，要求采用较低的焊接热输入量。

奥氏体耐热钢的另一重要特性是非磁性（磁导率1.02）。但冷作加工可提高强度和磁导率。铁素体和马氏体型耐热钢的磁导率为600～1 100，弥散硬化型耐热钢焊的磁导率为100以下。这四类高合金耐热钢的焊接性主要因其金相组织的不同而异。马氏体型耐热钢的焊接性主要因高的淬硬性而恶化。铁素体性耐热钢焊接时，由于不发生同素异形转变，导致重结晶区晶粒长大，结果使接头的韧度降低。奥氏体耐热钢焊接的主要问题是热裂倾向较高，而弥散硬化型耐热钢的焊接特性与弥散过程中的强化机制有关。

表4.4-37　高合金耐热钢退火状态下的典型物理性能数据

物理性能	钢种				
	奥氏体钢	铁素体钢	马氏体钢	弥散硬化钢	碳素结构钢
密度/$g \cdot m^{-3}$	7.8～8.0	7.8	7.8	7.8	7.8
弹性模数/GPa	193～200	200	200	200	200
平均线胀系数（0～538℃）/10^{-6} K^{-1}	17.0～19.2	11.2～12.1	11.6～12.1	11.9	11.7
热导率（100℃）/$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	18.7～22.8	24.4～26.3	28.7	21.8～23.0	60
比热容（0～100℃）/$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	460～500	460～500	420～460	420～460	480
电阻率/$\mu\Omega \cdot cm$	69～102	59～67	55～72	77～102	12
熔点/℃	1 400～1 450	1 480～1 530	1 480～1 530	1 400～1 440	1 538

（1）马氏体耐热钢的焊接特性

马氏体耐热钢基本上是Fe-Cr-C系合金。通常铬含量是11%～18%。为提高其热强性还加入Mo、V等合金元素。这些钢几乎在所有的实际冷却条件下转变成马氏体组织。

马氏体耐热钢由于含有足够数量的铬，使其自820℃以上温度冷却时具有空淬倾向，而从960℃以上温度淬火可达到最高的硬度。图4.4-41示出X20CrMoV12-1高铬钢的连续冷却组织转变图。从图中可见，即使在很低的冷却速度下也会产生淬火而形成马氏体组织。这种钢约在1 050℃完全奥氏体化，从该温度快速冷却时形成全马氏体组织。而快速加热到820～960℃温度区间，奥氏体的转变是不完全的。从该温度区间连续冷却，最终形成铁素体和马氏体显微组织。

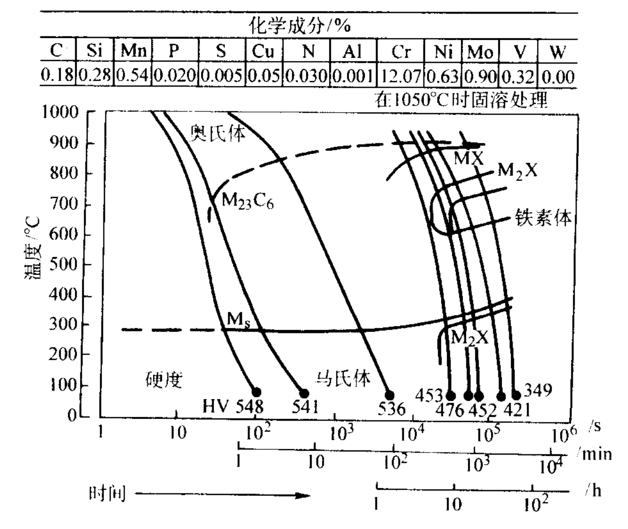
对于高铬耐热钢，铬合金对钢的焊接行为有明显的影响。当铬含量从11%增加到17%时，钢的淬硬特性会发生重大变化。当钢的碳含量约为0.08%时，则12%铬钢的焊接热影响区为全马氏体组织。而在15%铬钢中，由于铬具有稳定铁素体的作用，可能阻止其完全转变为奥氏体而残留部分未转变的铁素体。这样在快速冷却的热影响区内只有一部分转变为马氏体，其余为铁素体。在马氏体组织中存在软的铁素体降低了钢的硬度和裂纹倾向。

马氏体高铬钢可在退火、淬火、消除应力处理或回火状态下焊接。热影响区的硬度主要取决于钢的碳含量。碳含量超过0.15%，热影响区硬度急剧提高，冷裂纹敏感性加大，韧度下降。由于这种钢的导热性较低，导致热影响区的温度梯度更为陡降，加上组织转变时的体积变化，可能引起较高的内应力，从而进一步提高冷裂倾向。

马氏体耐热钢焊接接头在焊后状态的工作能力取决于热影响区的综合力学性能，包括硬度和韧度之间的合适匹配。



但为实现这点，往往是相当困难的。因此，为保证马氏体耐热钢焊接接头使用的可靠性，通常总是规定作焊后热处理。



化学成分/%

C	Si	Mn	P	S	Cu	N	Al	Cr	Ni	Mo	V	W
0.18	0.28	0.54	0.020	0.005	0.05	0.030	0.001	12.07	0.63	0.90	0.32	0.00

在1050°C时固溶处理

图 4.4-41 X20CrMoV12-1 高铬钢连续冷却组织转变图

（2）铁素体高合金耐热钢的焊接特性

铁素体高合金耐热钢是一组低碳高铬 Fe-Cr-C 合金。为阻止加热时形成奥氏体，在钢中可加入 Al、Nb、Mo 和 Ti 等铁素体稳定元素。如图 4.4-42 所示，随着铬含量的增加，碳含量的降低，奥氏体区尺寸缩小，当铬含量大于 17% 或碳含量小于 0.03% 时，Cr12% 钢内不可能再形成奥氏体而形成纯铁素体组织。因此这些钢不可能被淬硬，冷裂倾向亦随之降低。但是普通铁素体耐热钢焊接过热区有晶粒长大倾向，使接头的韧度和塑性急剧下降。为改善其焊接性，在降低碳含量的同时增加少量铝（0.2%），以阻止在高温区奥氏体的形成和晶粒过分长大。但为获得塑性较高的接头，焊后仍需退火处理。

在某些铁素体高铬钢中，于 820℃ 以上温度可能形成少量的奥氏体。从高温冷却时，奥氏体转变为马氏体，造成轻微的淬硬。因为钢中只有一部分马氏体，其余还是软的铁素体，能经受住马氏体相变应力。马氏体主要在铁素体的晶界形成，对接头的塑性可能起不利的作用。对于这些铁素体铬钢，焊后最好在 760 ~ 820℃ 范围内作退火处理。

改善铁素体耐热钢焊接性的最新方法是，降低钢中间隙元素（C、N、O）的含量，提高钢的纯度，并加入适量的铁素体稳定剂。这样可完全避免马氏体的形成。在一般的情况下，焊前无需预热，焊后亦不需热处理。在焊后状态，接头具有较好的塑性和韧度。

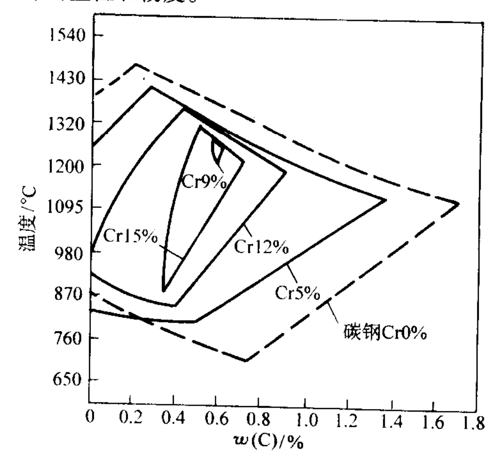


图 4.4-42 铬和碳含量对高铬奥氏体区范围的影响

铬含量高于 21% 的铁素体耐热钢在 600 ~ 800℃ 温度范围内长时加热过程中会形成金属间化合物 σ-相，其性质硬而脆，硬度高达 HV800 ~ 1 000，由 Cr52% 和 Fe48% 组成。如钢中含有 Mo 或其他元素，则 σ-相可能具有较复杂的成分。σ-相的形成速度取决于钢中铬含量和加热温度。在 800℃ 高温下 σ-相的形成速度可能达到最高值。在较低的温度下，σ-相的形成速度减慢而需要较长的时间。

在高铬钢中添加 Mo、Si、Nb 等元素会加速 σ-相的形成。对于某些高铬钢，如 Cr21Mo1、Cr29Mo4 和 Cr29Mo7Ni2 等钢，甚至会在焊接过程中由于多层焊道热作用而沿晶界形成 σ-相，导致接头室温和高温韧度的降低。

Cr 含量大于 17% 的高铬钢在 450 ~ 525℃ 之间温度下加热也可能由于沉淀过程产生 475℃ 脆性。如焊件在上述温度区间长时间高温运行，铬含量较低的耐热钢（14%）亦会倾向于 475℃ 脆变。因此对于铁素体耐热钢焊件来说，应当避免在 600 ~ 800℃ 以及 400 ~ 500℃ 的临界温度区间作焊后热处理。

不过 σ-相的转变和 475℃ 脆变都是可逆的。σ-相可以通过 850 ~ 950℃ 的短时加热，随即快速冷却来消除。而 475℃ 脆变可在 700 ~ 800℃ 短时加热，紧接水冷加以消除。

所有铁素体耐热钢在 900℃ 以上温度加热时都具有晶粒长大的倾向，铬含量愈高，晶粒长大的倾向愈严重，自 1 050℃ 温度以上，粗晶会加速形成，粗晶的形成导致钢材变形能力降低。恢复变形能力的方法有冷加工加退火以细化晶粒，也可在钢中添加钛、氮和铝等元素，通过成核作用而遏制粗晶的形成。

铁素体耐热钢焊接接头的热影响区内，由于焊接高温的作用不可避免会形成粗晶。晶粒长大的程度取决于所达到的最高温度及其保持时间。粗晶必然导致焊接接头过热区韧度的下降。因此，在铁素体耐热钢焊接时，为避免在高温下长时停留而导致粗晶和 σ-相的形成，应采用尽可能低的热输入量进行焊接，即采用小直径焊条、低焊接电流、窄焊道技术、高焊速和多层焊等。对于某些对焊接热特别敏感的铁素体钢，应在焊接工艺评定规程上明确规定最高容许的焊接线能量。

（3）奥氏体耐热钢的焊接特性

奥氏体耐热钢与奥氏体系列不锈钢具有基本相同的焊接特点。总的来说，这类钢由于具有较高的塑性和韧度，且不可淬硬，与低合金、中合金及高合金马氏体、铁素体耐热钢相比，具有较好的焊接性。奥氏体耐热钢焊接的主要问题有：铁素体含量的控制、焊接热裂纹、接头各种形式的腐蚀和 σ-相的脆变等。本节主要讨论与奥氏体耐热钢焊接密切相关的铁素体含量控制和 σ-相脆变的问题。

1）铁素体含量的控制　奥氏体耐热钢焊缝金属中铁素体含量关系到抗热裂性、σ-相脆变和热强性能。从提高抗热裂性出发，要求焊缝金属中含有一定量的铁素体，但从防止 σ-相脆变和提高热强性考虑，铁素体含量愈低愈好。从焊接冶金和焊接工艺上妥善和合理地解决这一矛盾是奥氏体耐热钢焊接的核心技术。

奥氏体铬镍钢焊缝金属的初次结晶可先以 δ-铁素体晶粒，也可以奥氏体晶粒结晶，这取决于焊缝金属中铁素体形成元素和奥氏体形成元素的含量比。例如，在 Cr18%、Ni8% ~ 10% 的焊缝金属中可能最先析出铁素体。这些铁素体晶体在缓慢冷却时可能富集铁素体形成元素。由于扩散速度随温度下降而减慢，因此在相继的 γ-结晶中不再达到平衡浓度，而使大量富集铁素体形成元素的区域仍为铁素体组织。这种金属实际上是亚稳奥氏体钢。Cr17% + 13Ni 的焊缝金属则是稳定奥氏体钢，它与前一种焊缝金属不同，在凝固时直接以奥氏体结晶，冷却后为全奥氏体组织。

各种不同成分的铬镍钢焊缝金属在焊后状态的铁素体含



量可按图4.4-43所示的德龙（Delong）组织图来确定。该组织图考虑到焊接过程中吸收的氮对组织的影响。在计算焊缝金属铬镍当量时，应按所采用的焊接方法和工艺参数计及母材对焊缝金属的稀释率。此外，还应考虑焊接熔池的冷却速度，随着冷却速度的提高，铁素体含量减少。

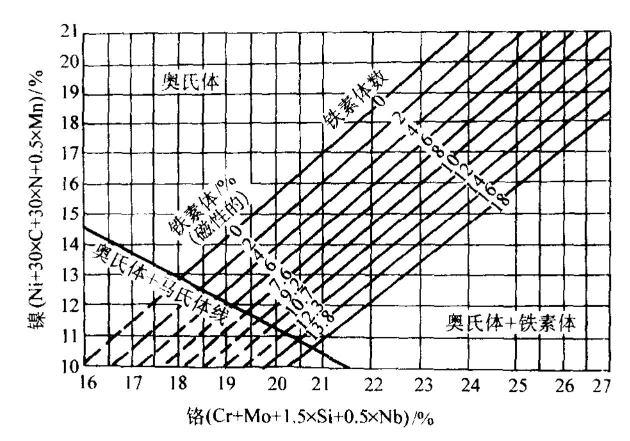


图4.4-43 铬镍高合金钢焊缝金属的德龙（Delong）组织图

奥氏体焊缝金属的力学性能与其铁素体含量存在一定的关系，如图4.4-44曲线所示，随着铁素体含量的增加，奥氏体铬镍钢焊缝金属的常温抗拉强度提高，塑性下降。然而，高温短时抗拉强度、高温持久强度及低温韧度随之明显降低。因此，对于奥氏体耐热钢焊接接头，应当考虑控制铁素体含量。在某些特殊的应用场合，可能要求采用全奥氏体的焊缝金属。

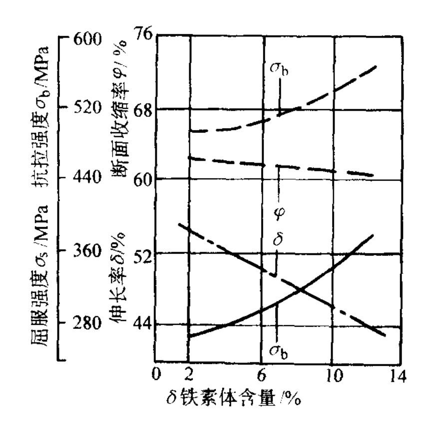


图4.4-44 铁素体含量对奥氏体铬镍钢焊缝金属力学性能的影响

2）σ-相的脆变　铬镍奥氏体钢材和焊缝金属在高温持续加热过程中亦会发生σ-相的脆变。σ-相的析出温度范围为650～850℃。Cr18Ni8钢在700～800℃温度下，Cr25Ni20钢在800～850℃温度下σ-相析出的敏感性最大。Cr25Ni20铬镍钢在800℃以下加热时，σ-相析出的速度要缓慢得多，在900℃以上高温下，σ-相不再析出。在Cr18Ni8钢中，当温度超过850℃时，σ-相不再形成。

焊缝金属与轧制材料不同，在奥氏体组织内总含有一定量铁素体。在高温加热过程中，铁素体逐渐转变为σ-相。随着转变温度的提高，σ-相倾向于球化。σ-相亦能直接从奥氏体中析出，或者在奥氏体晶体内以魏氏体组织形式析出。

σ-相的析出速度在很大程度上取决于金属的原始组织和加热过程的特性参数。σ-相从铁素体转变的速度要比从奥氏体转变快很多倍。奥氏体钢在高温加热过程中，如产生塑性流变或施加压力，则可大大加快σ-相的析出。

在奥氏体钢中σ-相析出的原因可能与温度升高时碳化物的溶解有关。由于碳和铬的扩散速度不同，在碳化物溶解时会形成一高铬区。σ-相就在这一区域析出。

σ-相的形成对奥氏体钢性能不利的影响是促使缺口冲击韧度明显降低。图4.4-45和图4.4-46分别示出高温持续加热

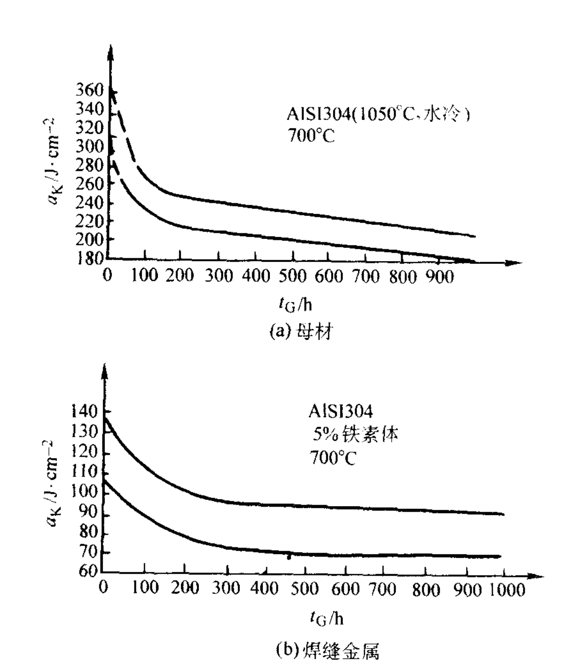


图4.4-45 700℃长时加热对Cr18Ni8钢及其焊缝金属冲击韧度的影响

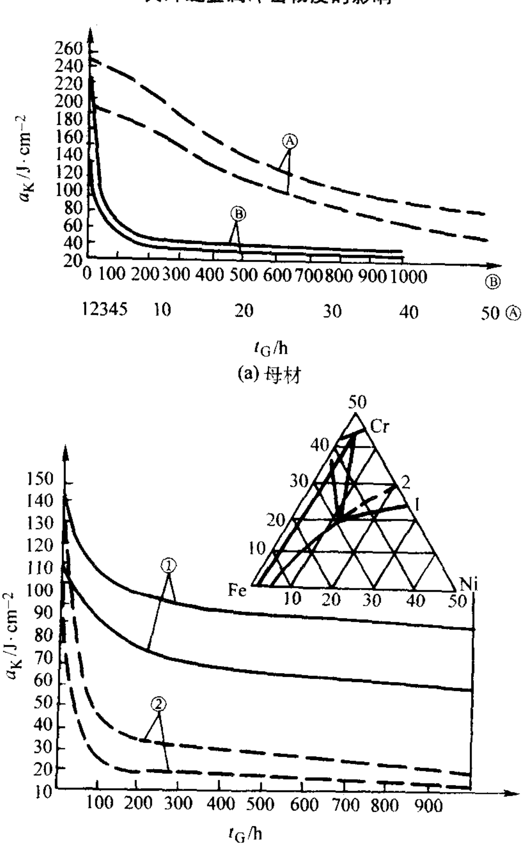


图4.4-46 800℃高温长时加热对25CrNi20钢及其焊缝金属冲击韧度的影响

对 Cr18Ni8 和 Cr25Ni20 钢及其焊缝金属冲击韧度的影响。σ-相对钢材性能危害的程度取决于它的形状、尺寸和分布形式。此外，σ-相对奥氏体钢抗高温氧化性和接头的高温蠕变极限亦有一定的有害影响。因此，必须采取相应措施控制奥氏体焊缝金属的 σ-相转变。

防止奥氏体钢焊缝金属 σ-相形成的最有效措施是调整焊缝金属合金成分，严格限制 Mo、Si、Nb 等加速 σ-相形成的元素，适当降低 Cr 含量并应提高 Ni 含量。例如 Cr23-Ni22 钢对 σ-相的敏感性比 Cr25-Ni20 钢低的多。在焊接工艺方面应采用低热输入量的焊接方法。焊后焊件应避免在 600～850℃温度区间作热处理。

（4）弥散硬化耐热钢的焊接特性

弥散硬化耐热钢是一种通过复杂的热处理获得高强度的高合金钢。这些钢不仅具有高的耐热性和抗氧化性，而且具有较高的塑性和断裂韧度。弥散硬化是加入钢中的铜、钛、铌和铝等元素促成的。这些附加成分在固溶退火或奥氏体化过程中溶解，而在时效热处理时产生亚显微析出相，由此提高了基体的硬度和强度。弥散硬化耐热钢按其从奥氏体化温度冷却时形成的组织可分为三类：即马氏体、半奥氏体和奥氏体弥散硬化耐热钢。

大多数马氏体弥散硬化钢在约 1 040℃下固溶处理，此时其组织主要为奥氏体。淬火时，奥氏体在 150～95℃温度区间转变为马氏体。在某些钢中，马氏体基体中可能含有少量铁素体。这类钢淬火成马氏体后，在时效处理过程中通过弥散机制而进一步强化。时效处理的温度范围为 480～620℃。

半奥氏体弥散硬化钢在固溶处理或退火状态的组织为奥氏体 + δ-铁素体，δ-铁素体所占比例最大可达 20%。这类钢通过三道热处理强化：固溶处理；马氏体转变冰冷处理；时效硬化处理。固溶处理的温度在 732～954℃范围内，冰冷处理温度在 -70℃以下，可使 30% 的奥氏体转变成马氏体。时效硬化实际是一种回火处理，即在 454～538℃温度范围内加热 3 h 后空冷。其作用是消除应力并使马氏体回火，进一步提高钢的强度和韧度。对于某些半奥氏体弥散硬化钢，例如美国钢种 AM350 和 AM355 钢，在时效处理之前，加一道调整处理，即在 774℃加热 2～4 h，空冷。其目的是在已形成的马氏体上或者在 δ-铁素体边界上沉淀碳化物，并使部分残余奥氏体转变为马氏体。

弥散硬化奥氏体钢的合金含量较高，足以使固溶处理后或任何时效处理或硬化处理后保持奥氏体组织。弥散硬化奥氏体钢的热处理比较简单，先作固溶处理，即加热到 1 100～1 120℃，然后快速冷却，接着在 650～760℃温度范围内作时效处理。在时效过程中，铝、钛和磷等元素会形成金属间化合物而使钢明显强化。但所达到的强度值总是低于弥散硬化马氏体钢或半奥氏体。

虽然弥散硬化奥氏体钢在成形、焊接、热处理之后总是保持奥氏体组织，但为产生弥散硬化而加入钢中的某些元素对钢的焊接行为产生不利影响。例如，铜、铌、铝和磷等可能在晶界上形成低熔点化合物而使钢具有热脆性。弥散硬化奥氏体钢的焊接性比普通奥氏体耐热钢较差。某些钢种还可能对焊接热影响区再热裂纹相当敏感。在这种情况下，必须选用低热输入量的焊接方法和特种焊接材料，确定适当的焊后热处理参数。

上述三类弥散硬化钢焊接时的共同问题是，为保证接头的力学性能和断裂韧度，焊件在焊后应作完整的热处理。对于大型和形状复杂的焊件，应在焊前先作固溶处理，焊后再作时效和硬化处理。

4.3　高合金耐热钢的焊接工艺

根据上述四类高合金耐热钢的焊接特点可知，马氏体高合金耐热钢的焊接性最差，其次是铁素体耐热钢和弥散硬化奥氏体钢，它们的焊接工艺有较大差别，分述如下。

（1）马氏体高合金耐热钢的焊接工艺

马氏体高合金耐热钢可采用所有的熔焊方法进行焊接。由于这种钢具有相当高的冷裂倾向，因此必须严格保持低氢和超低氢的焊接条件和低的冷却速度。对于拘束度较大的接头，除了必须采用低氢焊接材料外，还应严格规定焊接温度参数和焊后热处理参数。

马氏体耐热钢通常要求采用铬含量和母材基本相同的同质填充焊丝和焊条。列入我国国家标准的高铬马氏体钢焊条品种尚不全。在实际生产中，为保证接头的性能，常选用相应按国际标准生产的国外公司的焊条。高铬马氏体钢的埋弧焊和氩弧焊可采用 H1Cr13、H0Cr14 焊丝。对于韧度要求较高的接头，应采用改良型高铬焊丝，如美国 AWS.A5.9 标准规定的 ER410NiMo，其主要化学成分为：w（C）≤0.06%、w（Cr）11.0%～12.5、w（Ni）4.0%～5.0%、w（Mo）0.4%～0.7%。多元合金系的马氏体钢，如 X20CrMoV12-1、X20CrMoV 马氏体钢，则应选用合金成分与和母材基本相似的特种焊条和焊丝。

高铬马氏体钢焊条电弧焊时，足够高的预热温度并保持不低于预热温度的层间温度是防止焊接裂纹的关键。常用的预热温度范围为 150～400℃。预热温度主要按钢的碳含量、接头壁厚、填充金属的合金成分和氢含量、焊接方法和接头的拘束度选定。表 4.4-38 列出按钢的碳含量分级推荐的预热温度、层间温度、热输入量和焊后热处理的要求。

表 4.4-38　马氏体高铬钢焊条电弧焊焊前预热温度、层间温度、热输入量和焊后热处理

钢中碳含量（质量分数）/%	预热温度范围/℃	层间温度/℃	焊接热输入量	焊后热处理要求
<0.10	150～200	≥150	中等	按壁厚定
0.10～0.20	200～300	≥250	中等	任何厚度均需热处理
0.20～0.50	300～400	≥300	高	任何厚度均需热处理

图 4.4-47 示出 X20CrMoV12-1 高铬马氏体钢完整的焊接工艺和焊后热处理规范。其中按壁厚规定了预热温度，当壁厚 $S<6$ mm 时，最低预热温度为 200℃，当接头壁厚大于 10 mm时，预热温度范围为 350～400℃，手工氩弧焊封底层焊道的预热温度可适当降低到 250℃。焊接结束后，厚度在 10 mm 以下的接头容许缓冷到室温，保持 30 min 后立即作焊后热处理。厚度在 10 mm 以上的接头，焊后应冷却到 100～120℃，保温 60 min 再作焊后热处理。焊后热处理温度 720～780℃，保温时间按接头壁厚和焊接方法确定。

	接头壁厚/mm	保温时间/h
焊条电弧焊接头	≤8	≥0.5
	>8≤30	≥1.0
	>30≤60	>2.0
	>60	>3.0
埋弧焊接头		>3.0

焊接场地	壁厚/mm	预热温度/℃	焊后热处理温度/℃
安装现场	<6	200	720～780
	6～10	250	
	>10	>250～350	
车间	<6	200	
	6～10	250	720～780
	>10	>250～350	控温　750



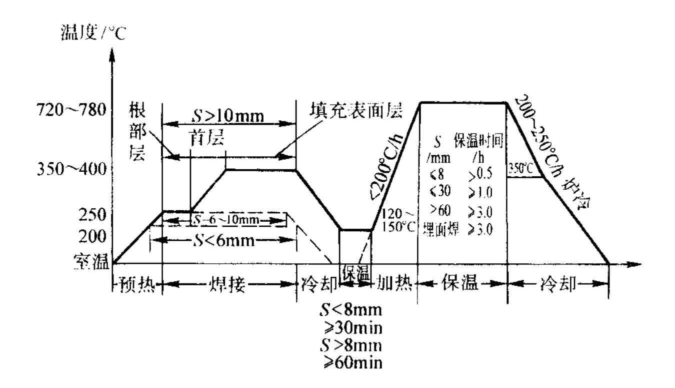


图 4.4-47　X20CrMoV12-1　高铬马氏体钢焊接和焊后热处理参数

高铬马氏体钢焊后热处理种类有：亚临界退火和完全退火。完全退火可使接头的多相组织转变成全铁素体组织，完全退火的温度范围为 830 ~ 885℃，保温结束后冷至 600℃，然后空冷。这种退火工艺要求严格控制整个加热和冷却过程。因此，除非要求达到最大限度的软化，一般不推荐采用这种热处理。亚临界退火的温度范围为 650 ~ 780℃，保温结束后空冷或以 200 ~ 250℃/h 的速度控制冷却。保温时间可按2.5 ~ 3 min/mm 计算。如填充金属的化学成分（包括碳含量）与母材基本匹配，焊后亦可作淬火 + 回火处理，以提高接头的性能并使之均匀化。

碳含量等于或大于 0.2% 的马氏体耐热钢焊件在焊接结束后立即作亚临界退火处理。

(2) 铁素体高合金耐热钢的焊接工艺

由于高铬铁素体耐热钢对过热较为敏感，只能采用低热输入量进行焊接。通常多采用焊条电弧焊和钨极氩弧焊。高铬铁素体耐热钢的焊接填充金属基本有三类：合金成分基本与母材匹配的高铬钢填充材料；奥氏体铬镍高合金钢；镍基合金。对于在高温下长时运行的焊件，不推荐采用奥氏体钢填充金属。而镍基合金由于价格昂贵，只有在特殊的场合下才被采用。列入我国国家标准（GB/T 983—1995）的铁素体耐热钢焊条有两种即 E430-16（302）及 E430-15（G307），适用于铬含量 17% 以下的各种高铬铁素体耐热钢。

由于在铁素体耐热钢中常见的铁素体形成元素铝和钛难以通过电弧过渡到焊缝金属，故迄今为止尚未研制出与这些铁素体耐热钢成分完全匹配的电弧焊焊条。为克服这一难题，可采用钨极氩弧焊或等离子弧焊。在惰性气体 Ar 的保护下，焊丝中的 Al、Ti 和 Nb 等元素不发生烧损而大部分过渡到焊缝金属中。然而，在我国现行国家焊丝标准中，尚未纳入高铬铁素体耐热钢焊丝。为此推荐采用美国 AWS A5.9 焊丝标准中规定的三种高铬合金钢焊丝。这些焊丝的牌号和标准化学成分综列于表 4.4-39。

表 4.4-39　美国 AWS A5.9 焊丝标准规定的高铬合金钢焊丝标准化学成分

焊丝牌号	化学成分（质量分数）/%										
	C	Cr	Ni	Mo	Nb 或 Ta	Mn	Si	P	S	N	Cu
ER430	≤0.10	15.5 ~ 17.0	≤0.60	≤0.75	—	≤0.60	≤0.50	≤0.03	≤0.03	—	≤0.75
ER630	≤0.05	16.0 ~ 16.75	4.5 ~ 5.0	0.75	0.15 ~ 0.30	0.25 ~ 0.75	≤0.75	≤0.04	≤0.03	—	3.25 ~ 4.00
ER26-1	≤0.01	25.0 ~ 27.5	≤0.50	0.75 ~ 1.50	—	≤0.40	≤0.40	≤0.02	≤0.02	≤0.015	≤0.20

高铬铁素体耐热钢焊接时，预热的作用与马氏体耐热钢焊接时不同。高铬铁素体耐热钢接头热影响区的晶粒会因焊接热循环的高温而急剧长大，并在缓慢冷却时降低韧度，而预热将延长接头在高温区的停留时间并降低接头的冷却速度而产生不利的影响。因此必须谨慎选择铁素体耐热钢的预热温度和层间温度。某些铁素体钢倾向于在晶界形成马氏体。在这种情况下，预热有助于防止焊接热影响区裂纹的形成并可降低焊接应力。

高铬铁素体耐热钢的预热温度主要根据钢的成分、所要求的接头力学性能、接头的壁厚和拘束度而定。适用的预热温度范围为 150 ~ 230℃，对于高拘束度接头层间温度应略高于预热温度。高纯度的铁素体耐热钢焊前可不必预热，这些钢在焊接热循环的冷却条件下不可能形成马氏体，冷裂倾向很小，热影响区亦不会因缓冷而脆变。

高铬铁素体耐热钢焊条电弧焊时，在焊接操作技术上要求尽可能压短电弧，以避免铬元素的氧化损失和氮的吸收。短弧亦可防止焊缝中气孔的产生。同理，不推荐采用电弧摆动焊接法。高纯度的铁素体耐热钢不宜焊条电弧焊，因为焊缝金属不可避免会被碳、氮、氧等所污染。最好采用钨极氩弧焊或等离子弧焊。

铁素体耐热钢接头通常在亚临界温度范围内作焊后热处理，以防止晶粒进一步长大。适用的焊后热处理温度范围为 700 ~ 840℃。在热处理过程中应注意最大限度地减少氧化。为防止脆变，在冷却过程中应快速通过 540 ~ 370℃的温度区间，这也有利于控制焊件的变形和残余应力。对于接头壁厚在 10 mm 以下的高纯度铁素体钢焊件，焊后不作焊后热处理，亦能保证接头各项性能达到规定的指标。其先决条件是焊缝金属内碳和氮总含量应限制在 0.03% ~ 0.05% 的范围内。对于 σ-相倾向较大的高铬铁素体钢，应尽可能避免在 650 ~ 850℃危险温度区间进行焊后热处理。热处理后应快速冷却。如要求接头具有均匀的力学性能，对于结构简单的焊件，可在焊后作淬火 + 回火处理。

(3) 奥氏体耐热钢的焊接工艺

奥氏体耐热钢与马氏体、铁素体耐热钢相比具有较好的焊接性，可以采用所有熔焊方法，包括焊条电弧焊、钨极氩弧焊、熔化极气体保护焊、药芯焊丝气体保护焊、等离子弧焊和埋弧焊等。某些对过热不太敏感的奥氏体钢亦可选用高效的电渣焊接法。

在拟定奥氏体耐热钢的焊接工艺规程时，必须考虑其特殊的物理性能，即低的热导率，高的电阻率和热膨胀系数以及高强度的表面保护膜。这些特性决定了焊件将产生较大的焊接扭曲变形，近缝区过热，并存在热裂纹和液化裂纹的危险。此外，奥氏体耐热钢含有大量的对氧亲和力较高的元素，因此，不论采用何种弧焊方法，都必须采取相应的有效措施，利用焊条药皮、焊剂和惰性气体对焊接熔池和高温区作良好的保护，以使决定热强性能的基本合金元素保持在所要求的范围之内。由于奥氏体钢，特别是纯奥氏体钢对焊接热裂纹的敏感性较高，故必须严格控制焊接材料中 C、S、P 等杂质含量，对焊丝和坡口表面作仔细的清理。

奥氏体耐热钢焊接填充材料的选择原则首先要保证焊缝的致密性、无裂纹和气孔等缺陷。同时应使焊缝金属的热强性基本与母材等强。这就要求其合金成分大致与母材成分匹配。其次应考虑焊缝金属内铁素体含量的控制，对于长期在高温下运行的奥氏体钢焊件焊缝金属内铁素体含量不应超过



5%。为提高全奥氏体焊缝金属的抗裂性，选用锰含量达6%～8%的焊接填充材料是一种行之有效的解决办法。表4.4-40列出我国常用的奥氏体耐热钢焊条和焊丝的标准型号和牌号及所适用的母材牌号。一种奥氏体耐热钢可采用不同牌号的焊条或焊丝来焊接，这主要取决于焊件的工作条件，即温度、介质和运行时间。气体保护焊和埋弧焊焊丝原则上应具有不同的合金成分，因为在埋弧焊过程中，焊剂或多或少对焊接熔池产生渗硅作用，合金成分铬亦会有一定程度的烧损。而在惰性气体保护焊时，因无任何冶金反应，焊丝中的合金成分基本上不会烧损。某些对氧亲和力特别高的元素，如钛、铝等可能因保护气氛混入微量氧气而产生微量的烧损。因此，气体保护焊焊丝的合金成分应基本上与母材成分相同。

奥氏体耐热钢焊接时，为减少焊接收缩变形，应注意尽量缩小焊缝横截面，V形坡口的张开角不宜大于60°。当焊件壁厚大于20 mm时，最好采用U形坡口。如焊件不能从内部施焊并要求全焊透，则可采用各种形状的可熔衬垫，或在坡口外侧使用钨极氩弧焊法焊接底层焊道并在坡口背面通成形气体。

表4.4-40 奥氏体耐热钢焊条和焊丝

钢　号	焊　条		埋弧焊焊丝牌号	气体保护焊焊丝牌号
	国标型号	牌　号		
0Cr19Ni9	E308-16	A101，A102	H0Cr19Ni9	H0Cr19Ni9
1Cr18Ni9Ti	E347-16	A112，A132	H1Cr19Ni10Nb	H0Cr19Ni9Ti
0Cr18Ni10Ti 0Cr18Ni11Nb	E347-16 E347-15	A132， A137	H0Cr19Ni10Nb	H0Cr19Ni9Ti H1Cr19Ni10Nb
0Cr18Ni13Si4	E316-16 E318V-16	A201，A202 A232	H0Cr19Ni11Mo3	H0Cr19Ni11Mo3
1Cr20Ni14Si2	E309Mo-16	A312	H1Cr25Ni13	H1Cr25Ni13
0Cr23Ni13	E309-16	A302	H1Cr25Ni13	H1Cr25Ni13
0Cr25Ni20	E310-16 E310Mo-16	A402 A412	H1Cr25Ni13	H1Cr25Ni20
0Cr17Ni12Mo2	E316-16	A201，A202	H0Cr19Ni11Mo3	H0Cr19Ni11Mo3
0Cr19Ni13Mo3	E317-16	A242	H0Cr25Ni13Mo3 焊剂 HJ-260 SJ-601，SJ641	H0Cr25Ni13Mo3 保护气体 Ar，Ar + $O_2$1% Ar + $CO_2$2%～3%，Ar + He

1）焊条电弧焊工艺　焊条电弧焊是奥氏体钢焊接中应用最普遍的焊接方法，奥氏体钢焊条极大多数采用高铬镍钢焊条芯，因其电阻率较高，焊条夹持端易于受电阻热的作用而提前发红，故应选用合适的焊接电流。焊条的耐发红性在一定程度上还应取决于焊条药皮的类型。目前已研制出多种耐发红的奥氏体钢焊条，提高了焊条的利用率。普通奥氏体耐热钢焊条适用的电流范围比相同直径的碳钢焊条低10%～15%，焊条头的损失率约为10%。

在操作技术上不推荐焊条摆动焊接法，而应采用窄焊道技术，以加快冷却速度。为保证焊缝质量，焊道宽度不应超过焊条直径的4倍，多层焊缝的厚度不大于3 mm。另外，由于铬镍奥氏体钢的熔点较低、焊缝熔深较浅，为保证坡口侧壁和焊缝层间熔合良好，应特别仔细清理焊道间焊渣。推荐采用薄片砂轮或钢丝刷清理焊缝表面。为使脱渣和清渣容易，焊道表面要求平整光滑，焊道边缘与坡口侧壁之间圆滑过渡。为此，最好选用工艺性能良好的钛钙型药皮焊条。虽然奥氏体焊缝金属对氢和氮等气体的溶解度较高，但焊条药皮中的水分仍能促使焊缝中气孔的形成。所以，奥氏体钢焊条在使用前应按药皮类型加以适当的烘干并妥善保管以免再度从大气中吸收水分。

2）熔化极惰性气体保护焊　奥氏体耐热钢的熔化极惰性气体保护焊与焊条电弧焊相比具有一系列的优点。首先其焊接过程是以连续送丝完成的，不存在焊条电弧焊时焊条头发红而造成的损失；其次是焊丝伸出长度较短，可采用较高的焊接电流而形成深熔的焊缝；第三使用惰性气体和Ar加少量CO_2或O_2的混合气体，熔化金属和气体基本上不发生化学反应，合金成分烧损极少，熔池表面几乎无焊渣或只有少量焊渣，简化了层间的清理工序，多层焊缝不易形成夹渣等缺陷。其缺点是保护气流的屏蔽性易受外界气流的干扰而降低保护效果，严重时会导致焊缝出现气孔，加剧合金成分的烧损，降低焊缝的质量。

奥氏体耐热钢的熔化极惰性气体保护焊可使用普通MIG/MAG半自动焊机或自动焊机来完成。由于Ar弧焊的热量比CO_2电弧高的多，故应采用相应措施，加强焊枪喷嘴的冷却。半自动焊适用的焊丝直径为ϕ0.6～1.2 mm，自动焊适用的焊丝直径为ϕ1.6～3.0 mm。焊接电源可使用各种形式的直流电源或直流脉冲电源。通常将焊丝接正极，即直流反极性接法。保护气体可采用纯氩，Ar + CO_2或Ar + O_2混合气体，纯氦和He + Ar + CO_2等混合气体。在Ar气中加入$O_2$1%或$CO_2$2%～3%，虽然这使保护气体具有一定的氧化性，但在很大程度上减小了熔滴的表面张力，易于实现喷射过渡，减少飞溅，提高了电弧的稳定性，改善了熔池金属对坡口边缘的润湿性能和焊缝的成形。在纯氩保护气体下容易形成深而窄的熔透，往往会造成坡口侧壁的未熔合，在Ar中加入少量CO_2，特别是加入50%He，可以获得较理想的熔透形状。

奥氏体耐热钢的熔化极惰性气体保护焊的电参数可选择比碳钢焊时较低的电流和电压。由于高铬镍钢的电阻率较大，在给定的伸出长度下，焊丝的熔化速度较高，在相同的焊丝直径下，以碳钢所要求的80%电流焊接奥氏体耐热钢，可获得相同的熔敷速度。在Ar + CO_2气体保护下，采用直径ϕ1.2～2.4 mm的焊丝，熔滴喷射过渡的电流范围为180～380 A，电弧电压25～33 V。以喷射过渡电弧可焊接的最小厚度为3 mm，适用的焊件厚度为6～25 mm。短路过渡焊接则采用较细的焊丝直径及较低的电流和电压。最常用的焊丝直径为ϕ0.8～1.2 mm，相应的电流范围为50～225 A，电弧电压为17～24 V。由于焊接热输入量低，宜于焊接厚3 mm以下的薄板，并能在任何位置下焊接各种接头。表4.4-41列出奥氏体耐热钢各种接头喷射过渡和短路过渡熔化极气体保护焊的典型工艺参数。

表 4.4-41 奥氏体耐热钢的熔化极惰性气体保护焊典型工艺参数

板厚/mm	熔滴过渡形式	接头和坡口形式	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/mm·min⁻¹	焊道数
3.2	喷射	I形坡口	1.6	200~250	25~28	500	1
6.4	喷射	60°V形坡口对接	1.6	250~300	27~29	380	2
9.5	喷射	60°V形坡口，1.6 mm钝边	1.6	275~325	28~32	500	2
12.7	喷射	60°V形坡口，1.6 mm钝边	2.4	300~350	31~32	150	3~4
19	喷射	90°V形坡口，1.6 mm钝边	2.4	350~375	31~33	140	5~6
25	喷射	90°V形坡口，1.6 mm钝边	2.4	350~375	31~33	120	7~8
1.6	短路	角接或搭接	0.8	85	21	450	1
1.6	短路	I形坡口对接	0.8	85	22	500	1
2.0	短路	角接或搭接	0.8	90	22	350	1
2.0	短路	I形坡口对接	0.8	90	22	300	1
2.5	短路	角接或搭接	0.8	105	23	380	1
3.2	短路	角接或搭接	0.8	125	23	400	1

3）药芯焊丝气体保护焊　药芯焊丝气体保护焊与实芯焊丝气体保护焊相比具有效率更高、焊缝质量和外表更好、飞溅更少和生产成本更低的优点。目前国内外已能批量生产一系列高铬镍奥氏体钢药芯焊丝。按照最新的发展，高合金钢药芯焊丝基本上分成以下四大类：金属粉芯型、自保护型、平焊位置气体保护型和全位置气体保护型。在重要结构的生产中，最常用的是后两类药芯焊丝。其药芯的类型大部分是钛钙型。平焊位置气体保护型药芯焊丝的药芯主要成分为 TiO_2、CaO、MgO 和 ZrO 并加少量的 Na 和 Li 等稳定剂。这类药芯形成的焊渣具有缓慢凝固的特性，故只适用于平焊和横焊位置。当采用 ϕ1.2 mm 的药芯焊丝，焊接电流从 160 A 起到 250 A 较宽的范围内均可实现无飞溅的熔滴喷射过渡。焊缝表面波纹细密光亮，渣壳自动脱离。熔敷效率高达 85%～90%。保护气体可采用 Ar + CO_2 或纯 CO_2 气体，可以获得相同质量的焊缝金属。

全位置气体保护型药芯焊丝的药芯主要成分与平焊位置的药芯焊丝成分类同，添加适量促使溶渣快速凝固的成分。在焊接过程中，溶渣对熔池金属起一定的支撑作用。在向上立焊位置，采用窄焊道技术可以达到较高的焊接速度，其工艺特性与平焊位置钛钙型药芯焊丝相似，在较宽的焊接电流范围内均可产生无飞溅的熔滴喷射过渡，并形成表面美观的焊缝。当采用 ϕ1.2 mm 的药芯焊丝时，最大焊接电流不应超过 250 A。保护气体最好采用 Ar80% + $CO_2$18%的富氩混合气体。

高合金钛钙型药芯焊丝与药皮焊条相比，熔化率可提高 2～3 倍，金属回收率增加 25%。虽然药芯焊丝的市售价高于药皮焊条，但总的焊接生产成本低于药皮焊条。符合 GB/T 17853—1999 标准，目前在市场上可批量供应的铬镍高合金耐热钢药芯焊丝品种有 E308HTX-X、E316TX-X、E309MoTX-X 和 E310MoTX-X 等。

4）钨极惰性气体保护焊　钨极惰性气体保护焊是奥氏体耐热钢最适用的焊接方法之一。因为在焊接过程中，填充金属直接向熔池添加，焊丝中的合金元素几乎不烧损，气体与熔化金属之间不发生任何反应。焊缝金属表面清净无渣，焊缝质量优异。此外，在惰性气体 Ar 的保护下，电弧十分平稳，熔池金属表面张力较大，易于在各种难焊位置下焊接各种形式的接头，并能获得表面成形良好的单面焊双面成形焊缝，具有很强的工艺适应性。通常，钨极氩弧焊的热输入量较低，故特别适用于对过热敏感的各种奥氏体耐热钢。这种熔焊方法的主要缺点是熔敷效率低、生产成本高，大多用于 10 mm 以下薄板和薄壁管的焊接。

近年来，在厚壁焊件的生产中已成功地应用热丝钨极氩弧焊，尤其是结合窄间隙焊技术，其焊接效率与大电流熔化极气体保护焊相当。最大焊件壁厚可达 120 mm。明显扩大了钨极惰性气体保护焊的应用范围。

奥氏体耐热钢的钨极惰性气体保护焊，按对焊件的技术要求，可采用氩、氦或其混合气体。单层焊或根部封底焊道焊接时，焊缝背面应通相同的气体保护。如对焊接质量无特殊要求，通常优先选用氩气，因为氩气在低流量下，亦能提供良好的保护。焊接厚度小于 1.5 mm 的薄板时，采用氩气保护不易烧穿。此外，在氩气下引弧比氦气容易的多，便于控制焊接熔池。氦气通常用于要求深熔的厚壁焊件。在自动焊中采用氦气保护可成倍提高焊接速度并可获得无咬边的外形美观的焊缝。在氩气中混合 50% 氦气可取得相似的效果。在某些工程领域内，亦可采用 Ar + 5%～7% H_2 混合气体，以增加熔深，提高焊接速度，并可降低气体的成本。

奥氏体耐热钢的钨极惰性气体保护焊通常使用恒流直流电源，正接极。也可采用频率范围为 0.5～20 Hz 的低频脉冲直流电源。引弧最好选用高频或高压放电引弧技术，不推荐可能引起焊缝金属夹钨的接触引弧。填充焊丝的合金成分基本上与熔化极气体保护焊焊丝成分相同 。手工氩弧焊时，适用的焊丝直径为 ϕ1.6～2.5 mm，自动氩弧焊常用的填充焊丝直径为 ϕ0.8～1.2 mm。

在拟定奥氏体耐热钢的钨极氩弧焊工艺规程时，应考虑这种钢材线膨胀系数大的特点，从焊接线能量的控制和焊接顺序的设计方面采取相应的措施，以防止不容许的焊接变形。在厚度小于 5 mm 的薄板焊接时，为消除焊接接头的扭曲变形，可采用的琴键式夹紧装置。各种厚度和不同形式坡口的接头在平焊、立焊和仰焊位置的手工钨极氩弧焊推荐工艺参数综列于表 4.4-42。

5）等离子弧焊　等离子弧焊实质上是一种压缩电弧钨极氩弧焊，由于等离子弧能量集中，弧柱温度高达 30 000℃，加上等离子气流流速高，它可一次穿透 10 mm 以下的对接缝，并通过锁孔效应实现单面焊双面成形，因此与常用的钨极氩弧焊相比，可大大提高焊接效率。另一方面，等离子弧与普通氩弧相比稳定性更高，且外界干扰因素对等离子弧特性的影响较少，可以获得质量更可靠稳定的焊接接头。故特别适用于对接头质量要求较高的奥氏体耐热钢的焊接。手工和自动等离子弧焊的应用范围正在扩大。在某些现代工业装备制造中，为确保接头的质量，在设计图样或在产品制造技术条件中都明确规定必须采用等离子弧焊。

奥氏体耐热钢焊件等离子弧焊的对接接头可按壁厚采用图 4.4-48 所示的坡口形式。壁厚在 8 mm 以下时，可采用不开坡口的直边对接，接缝的间隙不应超过壁厚的 10%。10 mm以上的对接接头，可加工成 60°V 形坡口，钝边尺寸可达 6 mm。开坡口的对接接头必须采用加填充丝的等离子弧焊。

目前，在工业生产中常用的等离子弧焊工艺有三种：即微束等离子弧焊、熔透型等离子弧焊和锁孔型等离子弧焊。



表 4.4-42　奥氏体耐热钢手工钨极氩弧焊推荐工艺参数

板厚/mm	接头及坡口形式	钨极直径/mm	焊接电流（直流正接）/A			焊接速度/mm·min⁻¹	焊丝直径/mm	氩气流量/m³·h⁻¹
			平焊	立焊	仰焊			
1.6	I 形直边对接 搭接 角接 T 形角接	1.6	80~100 100~120 80~100 90~100	70~90 80~100 70~90 80~100	70~90 80~100 70~90 80~100	300 250 300 250	1.6	0.3
2.4	I 形直边对接 搭接 角接 T 形角接	1.6	100~120 110~130 100~120 110~130	90~110 100~120 90~110 100~120	90~110 100~120 90~110 100~120	300 250 300 250	1.6 或 2.4	0.3
3.2	I 形直边对接 搭接 角接 T 形角接	2.4	120~140 130~150 120~140 130~150	110~130 120~140 110~130 115~135	105~125 120~140 115~135 120~140	300 250 300 250	2.4	0.3
5.0	I 形直边对接（留间隙） 搭接 角接 T 形角接	2.4 2.4，3.0 3.0 3.0	200~250 225~275 200~250 225~275	150~200 175~225 150~200 175~225	150~200 175~225 150~200 175~225	250 200 250 200	2.4	0.5
6.5	60°V 形坡口对接 搭接 角接 T 形角接	3.0	275~300 300~375 275~350 300~375	200~250 225~275 200~250 225~275	200~250 225~275 200~250 225~275	125 125 125 125	3.0	0.5

微束等离子弧焊适用的厚度范围为 0.01~1.5 mm，熔透型等离子弧焊适用的厚度范围为 1.5~3 mm。锁孔型等离子弧焊的适用厚度范围为 3.0~20 mm。按接头的质量要求等离子弧焊可采用填丝和不填丝的方法来完成。

等离子弧焊的离子气和保护气体通常采用电离度较低的氩气。为进一步提高焊接速度，也可采用体积比为 7.5% 的 $Ar+H_2$ 混合气体。在焊接厚度大于 10 mm 的对接接头时，可以采用双焊炬提高焊接效率，即前置焊炬穿透钝边，完成封底焊道，紧跟的后置焊炬及送丝系统完成盖面层焊道。如要求焊缝余高均匀，可将焊炬作适当的横向摆动。

表 4.4-43 列出厚 0.15~3.0 mm 奥氏体耐热钢管纵缝微束等离子弧焊和熔透型等离子弧焊的典型工艺参数。壁厚 3~20 mm 高铬镍奥氏体钢焊件锁孔型等离子弧焊的典型工艺参数列于表 4.4-44。

6）埋弧焊　埋弧焊的特点是热输入量高，熔池尺寸较大，其冷却速度和凝固速度较慢。这些因素对奥氏体耐热钢

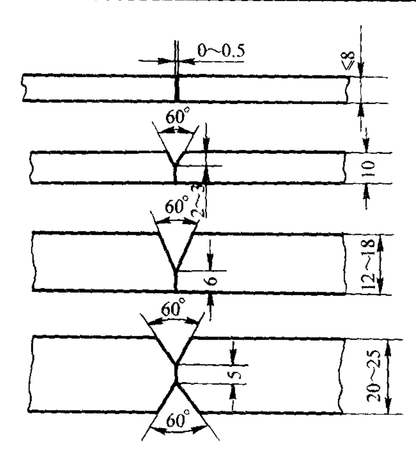


图 4.4-48　奥氏体耐热钢等离子弧焊对接接头坡口形式

表 4.4-43　奥氏体耐热钢管纵缝等离子弧焊典型工艺参数

壁厚/mm	接头形式	焊接工艺参数						备　注
		焊接电压/V	焊接电流/A	等离子气体/L·min⁻¹	保护气体/L·min⁻¹	喷嘴直径/mm	焊接速度/mm·min⁻¹	
0.15	I-直边对接	21	13	0.45	4	1.0	2 000	德国钢号 X5CrNi189 X10CrNiMoTi1810 等离子气 DIN 32526-I1 保护气 DIN 32526-R2
0.2		26	120	0.40	20	2.0	8 200	
0.4		25	140	0.40	20	2.8	7 600	
0.63		25	165	0.50	20	2.8	6 900	
0.7		24	185	0.50	18	2.8	6 100	
0.8		23	200	0.60	18	2.8	5 000	
1.0		25	220	0.80	15	3.2	4 500	
1.5		25	240	1.00	15	3.2	3 000	
2.0		25	270	1.50	12	3.2	2 100	
3.0		25	300	2.50	12	3.2	1 200	

表 4.4-44 高铬镍奥氏体钢焊件的锁孔型等离子弧焊典型工艺参数

壁厚/mm	接头形式	焊接电流/A	焊接速度/mm·min⁻¹	等离子气体/L·min⁻¹	保护气体/L·min⁻¹	备注
3.0	I形直边对接	160	650	5	20	等离子气：Ar 保护气体：$Ar+5\%H_2$
4.0	I形直边对接	180	600	6	20	
5.0	I形直边对接	190	500	7	20	
6.5	I形直边对接	200	350	7	20	
7.5	I形直边对接	210	250	7	20	
10	Y形坡口对接	240	220	7	20	
12	Y形坡口对接	240	220	7	20	
16	Y形坡口对接	240	220	7	20	
20	X形坡口对接	240	220	7	20	

的焊缝质量产生不利影响。它加剧了焊缝金属中合金元素和杂质的偏析，促使形成粗大的初次结晶，最终导致焊缝金属和近缝区热裂倾向的提高。奥氏体钢焊缝的裂纹机率主要取决于焊缝金属中杂质的含量和初次结晶的模式。因此应将焊缝金属中的硅、硫、磷含量控制在尽可能低的水平。在合金元素中，锰可显著提高焊缝的抗热裂性，故奥氏体耐热钢的埋弧焊，最好选用锰含量较高的焊丝。为减少奥氏体焊缝金属的硅含量，应选用中性或碱性焊剂，以避免焊剂向焊缝金属渗硅。目前已研制出各种奥氏体钢埋弧焊碱性烧结焊剂。另外还开发了添加铬、锰、铌、钼等金属粉末的合金烧结焊剂，以补偿焊接过程中铬、钼等合金元素的烧损。国产碱性烧结焊剂 SJ-60 和 SJ-601Cr 即属于这类焊剂。奥氏体耐热钢的埋弧焊可采用交流电和直流反接极，这主要取决于所用焊剂的特性。由于在低电流下直流电弧更加稳定，故在大多数情况下均采用直流电。因奥氏体铬镍钢电阻率较高，熔点较低，在使用相同焊丝时，焊接电流应比碳钢焊接时低 20%。同理，应严格控制焊丝伸出长度。伸出长度过大和导电嘴接触不良，都会造成焊丝熔化速度不均匀和焊缝成形不规则。

控制母材对焊缝的稀释率是奥氏体铬镍钢的另一个重要技术问题。埋弧焊时母材稀释率的变化范围相当宽，从 10%～75%，这就对焊缝金属的成分产生重大影响，亦关系到焊缝组织中铁素体含量的控制。为此，在坡口形式和尺寸设计及焊接参数计算时，应以母材稀释率低于 40% 为原则。

各种规格焊丝埋弧焊适用的焊接电流范围列于表 4.4-45。实际上，对于奥氏体钢来说，大多数采用 ϕ4 mm 以下的焊丝。最大焊接电流不超过 500 A。

表 4.4-45 奥氏体耐热钢埋弧焊焊丝直径与电流的关系

焊丝直径/mm	适用电流范围/A	焊丝直径/mm	适用电流范围/A
2.5	140～500	5.0	400～1 200
3.2	220～800		
4.0	340～1 000		

7）焊后热处理　关于奥氏体耐热钢焊件的焊后热处理，各国制造规程一般不作规定。如因焊件结构、厚度及热加工经历等要求作热处理时，可由制造厂与用户之间协商确定。按生产经验，当奥氏体钢厚度超过 20 mm 时，应根据结构复杂程度作适当的热处理。奥氏体耐热钢焊件的焊后热处理的目的可归结为：消除焊接残余应力，提高结构尺寸的稳定性；提高接头的高温蠕变极限；消除不恰当的热加工所形成的 σ-相。奥氏体耐热钢焊件的焊后热处理按其温度可分为低温焊后热处理、中温焊后热处理和高温焊后热处理。

低温焊后热处理是指加热温度在 500℃以下的热处理。这种热处理对接头的力学性能不会发生重大影响。其作用主要是降低残余应力峰值，提高结构尺寸的稳定性。对奥氏体铬镍钢来说，加热温度 200～400℃的焊后热处理可降低峰值应力 40%左右，但平均应力只能降低 5%～10%。实际生产中低温焊后热处理的温度范围为 400～500℃。

加热温度在 550～800℃的热处理为中温热处理。这种热处理的主要目的是消除奥氏体耐热钢焊接接头中的焊接应力，从而提高接头抗应力腐蚀的能力。但在这一温度区间可能发生 σ-相和碳化物的析出而降低接头和母材的韧度。因此，对于碳含量较高或铁素体含量较多的奥氏体钢焊缝，选用中温热处理要特别谨慎。对于某些超低碳铬镍奥氏体钢，800～850℃的中温热处理可提高接头的蠕变极限和塑性。

高温焊后热处理的加热温度在 900℃以上。其目的是溶解在焊接热循环作用下形成的 σ-相和碳化物，以恢复接头由此而损失的力学性能。为获得全奥氏体组织的固溶处理亦属于高温热处理。由于固溶处理过程中，冷却速度很快，工件将产生较大的变形，故那些形状较简单的焊件或半成品才能作这种热处理。几种常用奥氏体耐热钢固溶处理推荐温度列于表 4.4-46。

表 4.4-46 常用奥氏体耐热钢固溶处理推荐温度

钢号	固溶处理温度/℃
0Cr19Ni9 AISI 201，202，301	1 010～1 120
0Cr28Ni13 0Cr17Ni12Mo2 0Cr19Ni13Mo3	1 040～1 120
1Cr18Ni9Ti 0Cr18Ni11Ti	954～1 065
0Cr18Ni11Nb	980～1 065

（4）弥散硬化耐热钢的焊接工艺

弥散硬化耐热钢可以采用任何一种能用于奥氏体耐热钢的焊接方法进行焊接。比较适用的焊接方法有：钨极惰性气体保护焊、熔化极惰性气体保护焊和等离子弧焊。因为至今尚未研制出与母材强度匹配的弥散硬化耐热钢焊条。埋弧焊接法的热输入量较高，弥散硬化耐热钢焊丝供应也有困难，其应用范围较窄。

弥散硬化耐热钢焊接时，如果要求接头达到与母材相等的高强度，则填充材料的合金成分应与母材基本相同。对于弥散硬化奥氏体耐热钢，由于存在焊接裂纹问题，不强求填充金属成分与母材完全一致。在一般情况下，可以采用奥氏



体耐热钢或镍基合金填充金属。表 4.4-47 列出推荐用于弥散硬化耐热钢焊接的焊条和焊丝。

表 4.4-47　推荐用于弥散硬化耐热钢焊接的焊条和焊丝

钢的类型	钢　号	药皮焊条	气体保护焊焊丝	埋弧焊焊丝
马氏体型	S17400 (17 ~ 4PH) S15500 (15 ~ 5PH)	AMS 5827B A101，A102	AMS 5826 H0Cr19Ni9 H0Cr19Ni9Ti	H0Cr19Ni9
半奥氏体型	1Cr17Ni7Al X17H5M3 S 35000 (AM350) S 35500 (AM355)	AMS 5827B AMS 5775A AMS 5718A	AMS 5824A H1Cr25Ni20 H1Cr25Ni13 AMS 5774B AMS 5780A	H1Cr25Ni20 ERNiCr-3 AMS 5774B
奥氏体型	0Cr15Ni25Ti2MoAlVB 1Cr22Ni20Co20Mo3W3NbN A286	A302，A312 A402	H1Cr25Ni13 H1Cr25Ni20	H1Cr25Ni13Mo3 H1Cr25Ni20 ERNiCrFe-6

1）焊条电弧焊　马氏体和半奥氏体弥散硬化耐热钢可采用药皮焊条电弧焊。如钢中不含铝和钛等元素，则熔敷金属的成分相似于母材。如不要求焊缝达到高强度，焊后不必作热处理弥散硬化，同时可采用 A102、A101 等普通奥氏体钢焊条焊接。专用于马氏体型弥散硬化耐热钢焊接的 AMS 5827 药皮焊条的熔敷金属具有下列成分：C_{max}0.06%、Mn_{max} 1.0%、Si_{max} 0.75%、Cr 16.25% ~ 17.50%、Ni 4.25% ~ 5.25%、Cu 3.0% ~ 4.0%、Nb + Ta 0.10% ~ 0.35%。焊前必须将焊条烘干，以使焊缝金属保持低氢含量。尽量使用短弧，以减少合金元素的氧化烧损。如要求焊缝具有等于或接近母材的强度性能，则应将焊件在焊后作相应的时效处理，例如在 520 ~ 600℃温度范围内作回火处理。对于半奥氏体弥散硬化耐热钢接头，焊后热处理的参数比较复杂，或者在 -73℃/3 h 冰冷 +454℃/3 h 回火，或者在上列处理前，加一道 932℃/1 h 的固溶处理。在某些情况下，也要求采用双重时效，即 746℃/3 h、空冷 +454℃/3 h、空冷。对于壁厚大于 12 mm 的焊件，通常要求焊后作固溶处理。

2）钨极惰性气体保护焊和等离子弧焊　钨极惰性气体保护焊通常用于厚 5 mm 以下的弥散硬化耐热钢接头的焊接。等离子弧焊的适用厚度范围为 10 mm 以下。这两种焊接方法所用的保护气体和焊接参数基本上与高铬镍奥氏体耐热钢相同。其主要优点是可采用成分与母材匹配的焊丝，从而可获得等强于母材的接头。表 4.4-48 列出几种含铝弥散硬化耐热钢焊丝的典型化学成分。采用这些焊丝焊接的钨极惰性气体保护焊和等离子弧焊接头具有良好的综合力学性能。

表 4.4-48　17-7、15-7Mo、14-8Mo 弥散硬化耐热钢焊丝成分（质量分数）　%

焊丝牌号	C	Mn	Si	Cr	Ni	Al	Mo	焊后处理
WPH 17-7	0.065	0.40	0.25	16.50	7.50	1.00	—	590℃时效
WPH 15-7Mo	0.065	0.40	0.25	14.50	7.50	1.00	2.25	590℃时效
WPH 14-8Mo	0.040	0.50	0.30	14.50	8.00	1.10	2.25	565 ~ 590℃时效
WPH 13-8Mo	0.040	—	0.01	13.00	8.00	1.00	2.25	570 ~ 590℃时效

3）熔化极惰性气体保护焊　采用熔化极惰性气体保护焊焊接弥散硬化耐热钢的适用范围较广，3 ~ 30 mm 的接头均可达到等强的质量要求。其特点是可以采用与母材成分相近的焊丝，且焊丝中的合金成分不易烧损，以使焊缝金属的成分与母材成分基本一致。

为提高电弧的稳定性，改善焊缝的成形，往往在氩气中加入 1% ~ 2%氧气，使保护气体具有轻微的氧化性。这样，焊丝中的易氧化元素铝和钛等会在熔滴通过电弧过渡时产生一定的烧损，结果使焊缝金属弥散硬化的效果减弱而降低了接头的强度。因此，在要求接头与母材等强的情况下，应当选用 Ar + He 混合气体，既能提高电弧的稳定性，又不致产生焊丝中合金元素的烧损。

4）埋弧焊　埋弧焊可用于厚度大于 5 mm 的弥散硬化耐热钢的焊接。如不要求焊缝金属与母材等强，可采用标准的铬镍奥氏体钢焊丝（参考表 4.4-47）。如焊件要求作焊后热处理，以使焊缝金属具有与母材相近的强度，则必须采用合金成分与母材相匹配的焊丝和特种焊剂。在焊接含铝、钛等合金元素的弥散硬化耐热钢时，应选用氧化性最小的焊剂，以保证焊丝中的铝大部分过渡到熔池金属中。最近研制出的高碱度烧结焊剂 SJ641 可满足上述要求。这种焊剂的主要成分为：SiO_2 22.84%、MnO 2.87%、CaF_2 18.50%、MgO 12.58%、CaO 7.63%、Al_2O_3 17.48%碱度为 2.0。

弥散硬化耐热钢埋弧焊时，必须严格控制焊接能量参数。焊接电流、焊接速度和电弧电压的变化都会影响焊剂的熔化量和焊渣与金属间的反应速度和时间，最终影响到焊缝金属的成分。因此，为获得质量稳定、性能均一的埋弧焊接头，用于焊接弥散硬化耐热钢的埋弧焊设备应具有焊接电流、电弧电压和焊接速度的闭环反馈系统，使上列能量参数在焊接过程中保持恒定不变。

各类弥散硬化耐热钢埋弧焊接头的焊后热处理工艺与焊条电弧焊类同。在大多数情况下，接头焊后至少应作时效处理，以提高接头的强度和降低焊接应力。

4.4　高合金耐热钢接头的性能

高合金耐热钢焊件可在极其不同的温度、负载和介质下工作。因此，对焊接接头性能的要求，应按焊接结构的实际用途而定。对于只要求长期耐高温的接头来说，除了满足常温力学性能的最低要求外，更重要的是必须具有足够的高温短时和高温持久强度、抗高温时效及抗高温氧化性等。对于重要的焊接结构，接头的设计基本遵循等热强性原则，即接头的高温短时或高温持久强度不应低于母材标准规定的相应值。在短期和中期服役的焊接结构中，接头的短时高温强度是最重要的考核指标。而在长期服役（10×10^4 ~ 20×10^4 h）的高温高压部件中，接头的高温持久强度或蠕变极限，是必须保证的强度考核指标。



如上所述，影响接头热强性的因素是多方面的，它不仅取决于填充金属的合金成分、焊缝金属的金相组织、焊接工艺和能量参数，而且还与焊后热处理的制度有关。因此，焊制热强性符合产品技术条件要求的接头是一项极其复杂的系统工程。不过，迄今已掌握的焊接冶金知识和焊接技术已基本解决了这一问题。图 4.4-49 和图 4.4-50 分别示出 X20CrMoV12-1高合金铬钼钒马氏体钢手工氩弧焊和焊条电弧焊接头的高温短时强度和接头的高温蠕变断裂强度实测数据。表 4.4-49 列出 AM355 弥散硬化耐热钢采用各种焊接方法焊接的接头在不同热处理状态下的室温力学性能数据。这些资料说明，即使是对热处理敏感的马氏体耐热钢和弥散硬化耐热钢，亦可获得与母材基本等强的焊接接头。表 4.4-50 列出了 AM355 钢焊接接头的高温短时力学性能。

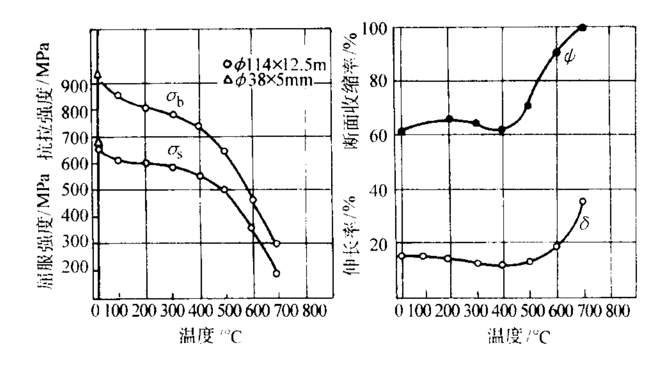


图 4.4-49　X20CrMoV12-1（12Cr-1MoV）高铬马氏体耐热钢接头在 20～700℃温度范围内抗拉强度试验结果

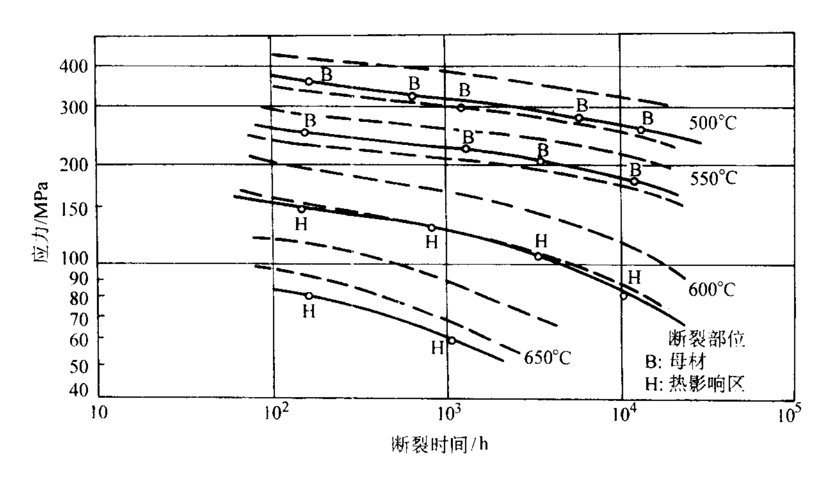


图 4.4-50　X20CrMoV12-1（12Cr-1MoV）高铬马氏体耐热钢接头的高温蠕变断裂强度曲线（500～650℃）

表 4.4-49　AM355 钢各种焊接接头和焊缝金属的室温力学性能

焊接方法与接头形式	热处理状态	σ_s/MPa	σ_b/MPa	$\delta_{50\,mm}$/%	ψ/%	A_{KV}/J	断裂位置
TIG 焊，焊丝 AM355 对接接头，厚 12 mm	L + SCT_{454}	1 187	1 406	4	—	—	焊缝
	E + L + SCT_{454}	1 207	1 427	7	—	—	焊缝
MIG 焊，焊丝 AM355 全焊缝金属	L + SCT_{454}	1 235	1 480	6	18	—	—
焊条电弧焊，AM355 焊条 全焊缝金属	E + L + SCT_{454}	1 118	1 201	12	26	—	—
	E + L + SCT_{538}	1 091	1 200	13	30	147	—
埋弧焊，AM355 焊丝 Arcosite-s-2 焊剂 全焊缝金属	E + L + SCT_{454}	1 166	1 338	11	24	—	—
	E + L + SCT_{538}	1 159	1 283	10	29	111	—

注：L-932℃/1 h 水淬、SCT_{454}--73℃/3 h 冰冷 + 454℃/3 h 回火；SCT_{538} - -73℃/3 h 冰冷 + 538℃/3 h 回火、E-746℃/3 h 空冷。

表 4.4-50　AM355 钢焊接接头的高温短时力学性能

试验温度/℃	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ (50mm) /%	δ (13mm) /%	热处理状态
室温	1 132	1 310	4.0	19	930℃/1 h + －73℃/2 h + 454℃/2h 空冷
149	1 043	1 310	6.5	18	
316	919	1 255	5.0	17	
370	823	1 242	4.5	14	
427	775	1 178	5.0	16	
482	707	1 098	6.0	14	

高铬镍奥氏体耐热钢焊接接头的力学性能主要取决于焊缝金属的合金成分而与热处理状态关系不大。这种耐热钢接头在焊后状态下就具有合乎要求的高温力学性能。表 4.4-51 列出各种 18-8 型铬镍奥氏体钢焊缝金属在 850℃以下高温短时力学性能典型数据。

这些数据表明，在 18-8 型铬镍奥氏体钢中，铌和钒显著提高了焊缝金属的高温短时强度，并仍具有足够的塑性。加入钨和钼亦能提高焊缝金属的持久强度。通过多元合金化，例如同时加入钒、铌和钼或钼、钨和钒多种元素，可使奥氏体焊缝金属达到最大的强化效果。这种强化不仅是由于铁素体含量的增加，而且也由于奥氏体基体强度的提高。焊件的使用温度愈高，多元合金化的强化效果愈明显。



表 4.4-51　18-8 型铬镍奥氏体钢焊缝金属在 850℃以下高温短时力学性能

钢　号	焊丝牌号	试验温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ (50 mm)/%	A_{kV}/J	焊缝金属主要合金成分（质量分数）/%
1Cr18Ni9Ti	H-04Cr19Ni9	+20	565	260	60	129	Cr19.2、Ni8.5、Ti0.1
	H-04Cr18Ni9V3Si		633	347	52.2	122	Cr18.5、Ni8.6、V1.0
1Cr18Ni11Nb	H-04Cr18Ni9V3Si		676	400	46.2	123	Cr19.4、Ni10.0、Nb0.92
1Cr18Ni9Ti	H-04Cr19Ni9	500	402	138	43.3		同上
	H-04Cr18Ni9V3Si		485	235	36.0	—	
1Cr18Ni11Nb	H-04Cr18Ni9V3Si		534	260	33.3	—	
1Cr18Ni9Ti	H-04Cr19Ni9	650	368	157	33.8	142	同上
	H-04Cr18Ni9V3Si		474	208	32.4	125	
1Cr18Ni11Nb	H-04Cr18Ni9V3Si		495	242	31.4	146	
1Cr18Ni9Ti	H-04Cr19Ni9	750	198	122	28.5	—	同上
	H-04Cr18Ni9V3Si		312	163	24.1	—	
1Cr18Ni11Nb	H-04Cr18Ni9V3Si		339	208	28.5	—	
1Cr18Ni9Ti	H-04Cr19Ni9	850	127	104	19.7	—	同上
	H-04Cr18Ni9V3Si		201	138	11.2	—	
	H-04Cr18Ni9V3Si		245	180	11.2	—	

奥氏体焊缝金属在 350～875℃高温区间长时间加热和运行可能促使焊缝金属冲击韧度急剧下降。这种脆变是高温时效的结果。主要是由于碳化物沿奥氏体晶体或晶界析出以及 σ-相和拉氏相的形成。当焊缝金属中 δ-铁素体含量大于 8%，即铬含量高于 20%，并以铝、钛、铌、钒和硅强化时，高温脆化现象相当严重。表 4.4-52 列出双相组织焊缝在 400～475℃温度长时加热后韧度逐渐降低的试验数据。这种焊缝金属的主要合金成分为：C 0.09%、Si 2.1%、Mn 1.5%、Cr 20.2%、Ni 8.0%、V 1.47%、Nb 0.54%。

表 4.4-52 数据还说明，焊缝金属的高温脆变可以通过 900℃低温淬火加以消除。当焊缝金属中含有钛时，淬火温度应提高到 950～1 000℃。

表 4.4-52　加热温度和时间对双相组织焊缝金属韧度的影响

加热温度和时间	焊后状态	400℃ × 24 h	450℃ × 24 h	450℃ × 48 h	450℃ × 272 h	450℃ × 500 h	450℃ × 800 h，900℃ × 1 h 水淬	475℃ × 18 h	475℃ × 42 h
冲击韧度（20℃）/J·cm⁻²	117	61.7	28.4	24.5	12.7	9.8	98	34.3	49

对于 25-20Cr-Ni 型纯奥氏体焊缝金属，650～875℃的长时加热可能由于 γ-δ 相的转变而使韧度下降。在含钨和钼的 25-20CrNi 型奥氏体焊缝金属中，这种变脆现象更为严重。

采用 06Cr25Ni13 或 Cr25Ni13Nb 型铬镍钢焊条焊接的焊缝金属由于铁素体含量较高，高温脆变的倾向亦比 Cr18Ni8 型焊缝金属严重的多。因此，对于在 450℃以上温度长时工作的高铬镍耐热钢焊件，原则上不应选用 Cr25Ni13 型铬镍钢焊条。

影响铬镍奥氏体钢及其焊缝金属韧度的另一重要机制是冷作硬化现象，经不同程度的塑性变形后，强度明显提高，塑性和冲击韧度急剧下降。表 4.4-53 列出 1Cr18Ni9Ti 钢埋弧焊焊缝金属经 10%～40%拉伸变形后强度性能和冲击韧度的试验结果。这些数据说明，18-8CrNi 钢焊缝金属经 40%冷变形后，屈服强度提高了 1 倍多，而伸长率下降了 46%，冲击韧度下降了 77%。

表 4.4-53　1Cr18Ni9 焊缝金属冷变形后的力学性能

冷变形度/%	σ_s/MPa	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%	a_K/J·cm⁻²	HB
焊后状态	318.5	593	60.0	55.6	107	149
10	360	608	54.7	64.0	78.4	207
20	498	685	54.7	66.0	50	241
30	609	747	43.5	55.6	33.3	255
40	692	774	28.0	55.6	24.5	262

注：焊缝金属主要合金成分（质量分数）：C 0.11%、Si 0.55%、Mn 0.94%、Cr 17.1%、Ni 10.8%。

奥氏体钢的冷作硬化可以通过 1 100～1 300℃的高温淬火来消除，但淬火的缺点是在工件表面会形成氧化皮并产生严重的畸变。因此，在许多情况下，以 800～900℃/空冷热处理代替淬火。

在许多工业应用场合，对耐热钢焊接接头也提出了抗氧化性的要求。钢的抗氧化性主要取决于钢中的合金成分，即能在钢表面形成坚固保护膜的元素，如铬、铝和硅等对提高钢的抗氧化性有积极贡献。为保证焊接接头与母材基本相同的抗氧化性，首先应使焊缝金属的合金成分接近于母材。但在焊接硅合金化的奥氏体耐热钢时，由于硅可能加剧高铬镍奥氏体钢焊缝金属的热裂倾向，必须限制焊接填充材料中的硅含量。

在奥氏体耐热钢中常见的合金元素钒和硼会明显降低钢的抗氧化性。钒含量较高的奥氏体钢焊缝不适用于 900℃以上的工作温度。

图 4.4-51 示出 18-15CrNiMn 型和 25-20CrNiMn 型两种焊缝



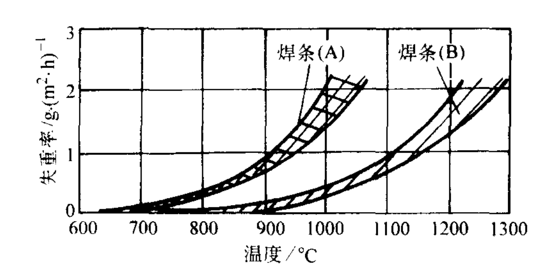


图4.4-51　两种CrNiMn型全奥氏体焊缝金属的抗氧化性
A—5.5%Mn，18.5%Cr，14.5%Ni
B—5.5%Mn，25.0%Cr，20.0%Ni

金属抗氧化性试验结果。由图示曲线可见，18-15CrNiMn型焊缝金属最高的抗氧化温度为950℃，而25-20CrNiMn型全奥氏体焊缝金属在1 200℃高温下的氧化失重率仍低于2.0 g/m³·h。

4.5　高合金耐热钢焊接实例

（1）高铬马氏体耐热钢焊接实例

大容量火电站锅炉蒸汽管道采用德国钢种X20CrMoV12-1马氏体耐热钢管制造。管子规格 ϕ114 mm×12.5 mm，其供货状态为1 050℃正火+760℃回火。对接接头U形坡口。采用手工氩弧焊封底，焊条电弧焊盖面，焊丝和焊条由德国Thermanit公司生产。具体焊接工艺规程见表4.4-54。

表4.4-54　X20CrMoV12-1高合金耐热钢管对接接头焊条电弧焊工艺规程

母　材	钢　号	X20CrMoV12-1	焊材	牌　号	MTS 4
	规　格	ϕ114 mm×12.5 mm		规　格	ϕ2.5 mm（手氩） ϕ4 mm（焊条电弧焊）
坡口形式及尺寸/mm	20°　12.5　$R5^{+1}_{0}$　$1^{+0.5}_{0}$				
预热及层间温度/℃	250～300℃		冷却方式	焊接结束后缓冷到100～120℃	
焊接能量参数	焊接方法及层次	电流/A	电压/V	焊速/mm·min⁻¹	Ar气流量/L·min⁻¹
	手工氩弧焊封底层 焊条电弧焊2～8层	90 130～140	11～12 24～26	100 150	5～6
焊后热处理	750℃×1 h，冷却速度200～250℃/h，焊后冷却程序结束后立即作焊后热处理				

（2）弥散硬化耐热钢焊接实例

弥散硬化耐热钢通常用于工作温度在550～750℃的高温承载部件，由于其强度相当高，大多数用来制造薄壁构件。

表4.4-55以PH15-7Mo为例列出1.0～1.3 mm薄壁对接接头自动钨极惰性气体保护焊的焊接工艺参数，以资参考。

表4.4-55　PH15-7Mo薄壁对接接头自动钨极惰性气体保护焊典型工艺参数

焊接工艺参数	接头厚度 1.0 mm	接头厚度 1.3 mm
接头形式	对接	对接
坡口形式	I—形直边对接，无间隙	I—形直边对接，间隙2.0～2.5 mm
钨极牌号及规格	EWth-2，ϕ1.0	EWth-2，ϕ1.6 mm
填充焊丝	PH13-8Mo超低碳，ϕ1.6 mm 用电阻压焊将焊丝预置在接缝上	PH15-7Mo超低碳可熔衬垫 PH13-8Mo超低碳焊丝 ϕ0.8 mm
保护气体/m³·h⁻¹	He　3.4 Ar　1.0	Ar　0.68 Ar　1.1
焊接位置	平焊	平焊
引弧方式	高频	高频
弧长/mm	引弧时0.5 mm，焊接时1.0 mm	—
送丝速度/cm·min⁻¹	—	500
焊接电流/A	26～30（正接）	60～70（正接）
焊矩摆动幅度/mm	无	4.3

(3) 奥氏体耐热钢焊接实例

在奥氏体耐热钢中，18-8 型铬镍耐热钢的应用最为普遍。表 4.4-56 列举厚 13mm 18-8 型铬镍耐热钢筒体纵缝埋弧焊工艺规程。

表 4.4-56　18-8 型铬镍耐热钢筒体纵缝埋弧焊工艺规程

焊接方法	埋　弧　焊	母　材	钢号：1Cr18Ni9Ti 规格：13mm
坡口形式及尺寸	$70^{\circ}{}^{+2^{\circ}}_{0}$ 13 3^{+1}_{0}	焊缝层次	1、2、3
焊接材料	焊丝牌号：00Cr22Ni10　规格：ϕ2.5 mm 焊剂牌号：HJ260	焊前准备	1）坡口表面及两侧 20 mm 和焊丝表面用丙酮擦除油污 2）焊剂 300 ~ 350℃烘干 2 h
预热及层间温度	预热温度：— 层间温度：≤120℃	焊后热处理	(900 ± 20)℃ × 1 h 稳定化处理
焊接能量参数	焊道层次：1 / 2 / 3 焊接电流/A：400 / 420 / 450		电弧电压/V：26 / 28 / 32 焊接速度/$mm \cdot min^{-1}$：500 / 600 / 460
操作技术	1）焊接位置：平焊 3）焊丝伸出长度：30 ~ 32 mm		2）单道焊技术 4）焊道两侧边缘用薄片砂轮清渣
焊后检查	100%射线照相检查		

编写：陈裕川（上海市焊接协会）

第 5 章　不锈钢的焊接

1　不锈钢的分类及其特性

1.1　不锈钢的分类

从不同的角度，不锈钢有不同的分类方法。常用的分类方法如下。

（1）按合金成分分

1）高铬不锈钢　含铬量在 12% 以上，典型的钢种为 Cr13 系列不锈钢。在 Cr13 的基础上，通过调整其合金成分可以获得多种类型的不锈钢，如图 4.5-1 所示。

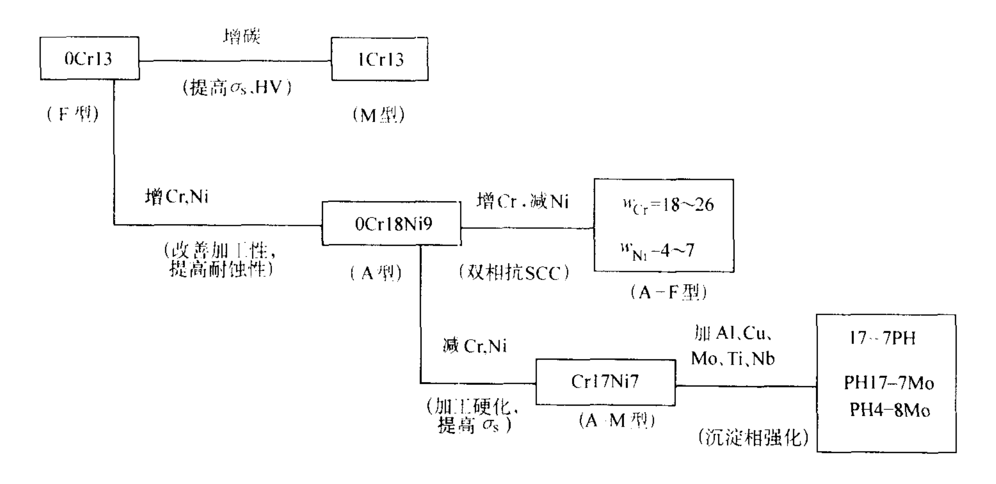


图 4.5-1　不锈钢类型

2）铬镍不锈钢　典型的钢种为 18-8 系列。在此基础上，通过调整合金成分可以获得多种类型的不锈钢，例如：

0Cr18Ni9 —降低含碳量，提高耐蚀性→ 00Cr19Ni10 —加 Mo、Cu、Ti，提高抗还原性酸蚀能力→ {00Cr17Ni14Mo2；00Cr18Ni14Mo2Cu2Ti}

0Cr18Ni9 —增加含碳量，提高强度→ 1Cr18Ni9

0Cr18Ni9 —加稳定碳化物元素 Ti、Nb，提高抗晶间腐蚀能力→ {0Cr18Ni9Ti；1Cr18Ni9Ti；1Cr18Ni11Nb}

0Cr18Ni9 —加 Mo、Cu、Ti，提高抗还原性酸及晶间腐蚀能力→ {1Cr18Ni12Mo2Ti；1Cr18Ni12Mo3Ti；0Cr18Ni12Mo2Cu2}

0Cr18Ni9 —增加 Cr、Ni，提高耐热性→ {1Cr23Ni13；1Cr25Ni20}

0Cr18Ni9 —以 Mn、N 代 Ni，节约 Cr、Ni→ {1Cr17Mn6Ni5N；1Cr18Mn8Ni5N}

3）铬锰氮不锈钢　根据我国矿产资源情况，在铬镍不锈钢的基础上，以 Mn、N 代替部分 Ni，形成铬锰氮不锈钢系，典型的钢种为 1Cr18Mn8Ni5N。

4）时效不锈钢　在铬镍不锈钢或高铬不锈钢的基础上，加入一些沉淀强化合金元素，如 Al、Cu、Mo、Ti、Nb 等，通过时效热处理，形成时效不锈钢系列，典型的钢种为 1Cr17Ni7Al、Cr17Ni4Cu4Nb 等。

（2）按用途分

1）不锈钢　包括高铬不锈钢，如 Cr13、Cr17，铬镍不锈钢，如 Cr18Ni9Ti、Cr18Ni12Mo3Ti；铬锰氮不锈钢，如 Cr17Mn13Mo2N 等。这类钢应用极为广泛，主要用于有侵蚀性的介质环境中，这类钢有很强的抗氧化和耐腐蚀性能，一般对强度要求不高。

2）热安定不锈钢　这类不锈钢主要用于高温环境下，有很强的抗氧化性能和耐气体介质腐蚀性能，也叫高温抗氧化不起皮不锈钢。对于高温强度并无特殊的要求。常用的热安定不锈钢有：铬镍不锈钢，如 Cr25Ni20、Cr25Ni20Si2 等；高铬不锈钢，如 Cr17、Cr25Ti 等。

3）热强不锈钢　这类不锈钢不仅要求在高温下有抗氧化和耐气体介质腐蚀性能，而且要求具有一定的高温力学性能。常用的有：高铬镍不锈钢，如 4Cr25Ni20、4Cr14Ni14W2Mo；以 Cr12 为基的多元合金化不锈钢，如 1Cr12MoWV 等。

通常将热安定不锈钢和热强不锈钢统称为耐热不锈钢。

（3）按室温组织分

1）奥氏体不锈钢　这类不锈钢在室温下基本上都是奥氏体，按照奥氏体的稳定性，又可分为稳定型奥氏体不锈钢，如 25-20 型不锈钢；亚稳定型奥氏体不锈钢，如 18-8 型不锈钢，通常含有 3% ~ 8% 的铁素体。奥氏体不锈钢，特别是 18-8 型奥氏体不锈钢使用最为广泛。由于奥氏体不锈钢的 Cr、Ni 含量均较高，因此，不仅具有优良的抗氧化性能和耐腐蚀性能，而且具有优良的塑韧性和优良的冷热加工性能。因而被广泛地应用于建筑、食品工业、医疗器械、纺织印染设备以及石油、化工、原子能等工业领域。同时由于奥氏体不锈钢具有良好高温性能和低温性能，因此也可用作热安定钢和低温用钢。

2）铁素体不锈钢　这类不锈钢在室温下基本上都是铁素体，含碳量较低，含铬量在 12.5%以上的高铬不锈钢属于这类钢，常用的铁素体不锈钢有 Cr13 型、Cr17 型和 Cr25 型。这类不锈钢具有良好的抗氧化性能和耐腐蚀性能，可用作热安定钢和耐蚀钢。Cr13 型不锈钢主要用于腐蚀环境不十分严重的室内装饰、厨房设备、家电产品、家用器具等；Cr17 型不锈钢在硝酸介质中具有较高的稳定性，常用来制造硝酸厂及化肥厂的化工设备，如吸收塔、热交换器、贮槽、运输硝酸的罐，以及透平压缩机叶轮等。低碳高铬铁素体不锈钢还

具有良好的抗 SCC、点蚀和缝隙腐蚀性能，常用于热交换器设备、耐海水腐蚀设备、耐有机酸腐蚀设备及制碱设备等。

3）马氏体不锈钢　这类钢的显微组织为马氏体，大多属于含碳量较高的 Cr13 型高铬不锈钢和以含铬量 12% 为基的多元合金化不锈钢，具有较高的抗氧化和耐蚀性能，而且具有较高的硬度、强度和高温性能。常用于量具、刃具、餐具、弹簧、轴承、汽轮机叶片、水轮机转轮、内燃机排气阀、泵、医疗器具、电站锅炉中的再热器管及主蒸汽管等。

4）双相不锈钢　又称奥氏体－铁素体不锈钢，铁素体所占体积百分比约为 30% ~ 60%，如 00Cr18Ni5Mo3Si2、Cr17Mn13Mo2N 等。这类不锈钢不仅具有较好的抗蚀性能，特别是抗晶间腐蚀和抗 SCC 性能比一般奥氏体不锈钢要强；而且具有较高的强度，它们的屈服强度约为一般奥氏体不锈钢的两倍，常用于制造有一定耐蚀要求的高强度容器及其零部件，如化肥厂尿素 CO_2 车间冷却器，化工厂制盐蒸发设备等。

5）沉淀硬化不锈钢　又称时效不锈钢，按其组织形态可分为：沉淀硬化半奥氏体型不锈钢、沉淀硬化马氏体不锈钢、沉淀硬化奥氏体不锈钢，如：0Cr17Ni7Al（17-7PH）、0Cr17Ni4Cu4Nb（17-4PH）、0Cr15Ni7Mo2Al 等，这类不锈钢不仅具有较高的强度和韧性，而且具有较好的耐蚀性能，通常作为耐磨、耐蚀、高强度结构件，如轴、齿轮、叶片、螺栓、销钉、垫圈、弹簧、阀、泵等零部件；以及压力容器、化工设备、航天航空、飞行器和核工业结构材料等。

1.2　不锈钢的化学成分

在我国国标中有不锈钢冷轧钢板（GB/T 3280—1992）不锈钢热轧钢板（GB/T 4237—1992）和耐热钢板（GB/T 4238—1992），其化学成分如表 4.5-1 所示。

不锈钢的合金元素总量约超过 10%，属于高合金钢范畴。其中铬的含量超过 12%，使钢表面容易钝化，提高了钢的抗氧化能力；根据 Tamman 理论的 $n/8$ 定律，使钢的电极电位发生跳跃性的增加，因此也提高了钢抗电化学腐蚀性能。

国产不锈钢板（包括钢带），有热轧和冷轧两种。冷轧不锈钢带又分为切边钢带和不切边钢带两种，其厚度有 0.30、0.40、0.50、0.60、0.70、0.90、1.00、1.20、1.50、2.00、2.50、3.00、3.50（mm）等规格；宽度有：20 ~ 150、> 150 ~ 250、> 250 ~ 400、> 400 ~ 600、> 600 ~ 1 000、> 1 000 ~ 1 250（mm）等规格。

表 4.5-1　不锈钢化学成分

奥氏体不锈钢												
牌　号	化学成分（质量分数）/%											备注
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他	
1Cr17Mn6Ni5N	≤0.15	≤1.00	5.50 ~ 7.50	≤0.060	≤0.030	3.50 ~ 5.50	16.00 ~ 18.00	—	—	≤0.25	—	
1Cr18Mn8Ni5N	≤0.15	≤1.00	7.50 ~ 10.00	≤0.060	≤0.030	4.00 ~ 6.00	17.00 ~ 19.00	—	—	≤0.25	—	
2Cr13Mn9Ni4	0.15 ~ 0.25	≤1.00	8.00 ~ 10.00	≤0.060	≤0.030	3.70 ~ 5.00	12.00 ~ 14.00	—	—	—	—	
1Cr17Ni7	0.15 ~ 0.25	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	6.00 ~ 8.00	16.00 ~ 18.00	—	—	—	—	
1Cr17Ni8	0.03 ~ 0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	7.00 ~ 9.00	16.00 ~ 18.00	—	—	—	—	
1Cr18Ni9	≤0.15	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00 ~ 10.00	17.00 ~ 19.00	—	—	—	—	
1Cr18Ni9Si3	≤0.15	2.00 ~ 3.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00 ~ 10.00	17.00 ~ 19.00	—	—	—	—	
0Cr18Ni9	≤0.07	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00 ~ 11.00	17.00 ~ 19.00	—	—	—	—	
00Cr19Ni10	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00 ~ 12.00	18.00 ~ 20.00	—	—	—	—	
0Cr19Ni9N	≤0.08	≤1.00	≤2.50	≤0.035	≤0.030	7.00 ~ 10.50	18.00 ~ 20.00	—	—	0.10 ~ 0.25	—	
0Cr19Ni10NbN	≤0.08	≤1.00	≤2.50	≤0.035	≤0.030	7.50 ~ 10.50	18.00 ~ 20.00	—	—	0.15 ~ 0.30	Nb≤ 0.15	
00Cr18Ni10N	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.50 ~ 11.50	17.00 ~ 19.00	—	—	0.12 ~ 0.22	—	
1Cr18Ni12	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.50 ~ 13.00	17.00 ~ 19.00	—	—	—	—	
0Cr23Ni13	≤0.080	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	12.00 ~ 15.00	22.00 ~ 24.00	—	—	—		




续表 4.5-1

牌号	化学成分（质量分数）/%											备注
奥氏体不锈钢												
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他	
0Cr25Ni20	≤0.080	≤1.50	≤2.00	≤0.035	≤0.030	19.00~22.00	24.00~26.00	—	—	—		
0Cr17Ni12Mo2	≤0.080	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.00~14.00	16.00~18.00	2.00~3.00	—	—		
00Cr17Ni14Mo2	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	12.00~15.00	16.00~18.00	2.00~3.00	—	—		
00Cr17Ni12Mo2N	≤0.080	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.00~14.00	16.00~18.00	2.00~3.00	—	0.12~0.22		
00Cr17Ni13Mo2N	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.50~14.50	16.50~18.50	2.00~3.00	—	0.12~0.22		
1Cr18Ni12Mo2Ti	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00~14.00	16.00~19.00	1.80~2.50	—	—	Ti=5(C%-0.02)~0.80	
1Cr18Ni12Mo3Ti	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00~14.00	16.00~19.00	2.50~3.50	—	—	Ti=5(C%-0.02)~0.80	除专用外，一般不推荐使用
1Cr18Ni9Ti	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00~11.00	17.00~19.00	—	—	—	Ti=5(C%-0.02)~0.80	
0Cr18Ni12Mo2Ti	≤0.080	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00~14.00	16.00~19.00	1.80~2.50	—	—	Ti=5(C%-0.02)~0.70	
0Cr18Ni12Mo3Ti	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00~14.00	16.00~19.00	2.50~3.50	—	—	Ti=5(C%-0.02)~0.70	
0Cr18Ni12Mo2Cu2	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.00~14.00	17.00~19.00	1.20~2.75	1.00~2.50	—	—	
00Cr18Ni14Mo2Cu2	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	12.00~16.00	17.00~19.00	1.20~2.75	1.00~2.50	—	—	
0Cr19Ni13Mo3	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00~15.00	18.00~20.00	3.00~4.00	—	—	—	
00Cr19Ni13Mo3	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00~15.00	18.00~20.00	3.00~4.00	—	—	—	
0Cr18Ni16Mo5	≤0.040	≤1.00	≤2.50	≤0.035	≤0.030	15.00~17.00	16.00~19.00	4.00~6.00	—	—	—	
0Cr18Ni10Ti	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	9.00~12.00	17.00~19.00			—	Ti≥5C	
0Cr18Ni11Nb	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	9.00~13.00	17.00~19.00	—	—	—	Nb≥10C	
0Cr18Ni13Si4	≤0.08	3.00~5.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.50~15.00	15.00~20.00	—	—	—	—	必要时可添加其他元素
2Cr23Ni13	≤0.20	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	12.00~15.00	22.00~24.00	—	—	—	—	
2Cr25Ni20	≤0.25	≤1.50	≤2.00	≤0.035	≤0.030	19.00~22.00	24.00~26.00	—	—	—	—	
1Cr16Ni35	≤0.15	≤1.50	≤2.00	≤0.035	≤0.030	33.00~37.00	14.00~17.00	—	—	—	—	
0Cr15Ni25Ti2MoAlVB	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	24.00~27.00	13.00~16.00	1.00~1.50	—	—	V=0.10~0.50，Ti=1.90~2.35，Al≤0.35，B=0.001~0.010	



续表 4.5-1

牌　号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他	备注
奥氏体不锈钢												
	化学成分（质量分数）/%											
0Cr25Ni20	≤0.08	≤1.50	≤2.00	≤0.035	≤0.030	19.00～22.00	24.00～26.00	—	—	—	—	
1Cr20Ni14Si2	≤0.20	1.50～2.50	≤1.50	≤0.035	≤0.030	12.00～15.00	19.00～22.00	—	—	—	—	
1Cr25Ni20Si2	≤0.20	1.50～2.50	≤1.50	≤0.035	≤0.030	18.00～21.00	24.00～27.00	—	—	—	—	
奥氏体铁素体双相不锈钢												
00Cr18Ni5Mo3Si2	≤0.03	1.30～2.00	1.00～2.00	≤0.030	≤0.030	4.50～5.50	18.00～19.50	2.50～3.00	—	≤0.10		必要时可添加其他合金元素
00Cr24Ni6Mo3N	≤0.03	≤1.00	≤1.50	≤0.040	≤0.030	4.50～7.50	22.00～26.00	2.50～4.00	—	0.08～0.30		
0Cr26Ni5Mo2	≤0.08	≤1.00	≤1.50	≤0.035	≤0.030	3.00～6.00	23.00～28.00	1.00～3.00	—	—		
1Cr18Ni11Si4AlTi	0.10～0.18	3.40～4.00	≤0.80	≤0.035	≤0.030	10.00～12.00	17.50～19.50	—	—	—	Ti = 0.40～0.70 Al = 0.10～0.30,	
1Cr21Ni5Ti	0.09～0.14	≤0.80	≤0.80	≤0.035	≤0.030	4.80～5.80	20.00～22.00	—	—		Ti = 5(C% − 0.02)～0.80	
铁素体不锈钢												
0Cr13Al	≤0.08	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	11.50～14.50	—	—	—	Al = 0.10～0.30	允许含有 Ni ≤0.60
00Cr12	≤0.030	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	11.00～13.50	—	—	—	—	
1Cr15	≤0.12	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	14.00～16.00	—	—	—	—	
1Cr17	≤0.12	≤0.75	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	16.00～18.00	—	—	—	—	
00Cr17	≤0.030	≤0.75	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	16.00～19.00	—	—	—	—	
1Cr17Mo	≤0.12	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	16.00～18.00	0.75～1.25	—	—	—	
00Cr17Mo	≤0.025	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	16.00～19.00	0.75～1.25	—	≤0.25	Ti、Nb、Zr 之和 8(C+N)～0.80	
00Cr18Mo2	≤0.025	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	17.00～20.00	1.75～2.50	—	≤0.25		
00Cr30Mo2	≤0.010	≤0.40	≤0.40	≤0.030	≤0.020	—	27.50～32.00	1.50～2.50	—	0.015	—	允许 Ni ≤0.50，Cu ≤0.20，且 (Ni + Cu) ≤0.50；必要时可添加其他元素
00Cr27Mo	≤0.010	≤0.40	≤0.40	≤0.030	≤0.020	—	25.00～27.50	0.75～1.50	—	0.015	—	
0Cr11Ti	≤0.08	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	10.50～11.75	—	—	—	Ti = 6C～0.75	允许含有 Ni ≤0.60
1Cr19Al3	≤0.10	≤1.50	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	17.00～21.00	—	—	—	Al = 2.00～4.00	



续表 4.5-1

牌　号	化学成分（质量分数）/%											备注
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	其他	
铁素体不锈钢												
2Cr25N	≤0.20	≤1.00	≤1.50	≤0.035	≤0.030	—	23.00～27.00	—	—	≤0.025	—	允许 Ni≤0.60，Cu≤0.30
马氏体不锈钢												
1Cr12	≤0.15	≤0.50	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	11.50～13.00	—	—	—	—	允许 Ni≤0.60，Cu≤0.30
0Cr13	≤0.08	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	11.50～13.50	—	—	—	—	允许 Ni≤0.60
1Cr13	≤0.15	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	11.50～13.50	—	—	—	—	允许 Ni≤0.60，Cu≤0.30
2Cr13	0.16～0.25	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	12.00～14.00	—	—	—	—	允许 Ni≤0.60
3Cr13	0.26～0.35	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	12.00～14.00	—	—	—	—	
4Cr13	0.36～0.45	≤0.80	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	12.00～14.00	—	—	—	—	
3Cr16	0.25～0.40	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	15.00～17.00	—	—	—	—	
7Cr17	0.60～0.75	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	—	16.00～18.00	—	—	—	—	允许 Mo≤0.75
1Cr17Ni2	0.11～0.17	≤0.80	≤0.80	≤0.035	≤0.030	1.50～2.50	16.00～18.00	—	—	—	—	
沉淀硬化不锈钢												
0Cr17Ni7Al	≤0.09	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	6.50～7.75	16.00～18.00	—	—	—	Al=0.75～1.50	
1Cr17Ni7Al	≤0.09	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	6.50～7.75	16.00～18.00	—	≤0.50	—	Al=0.75～1.50	

1.3　不锈钢的力学性能

常用不锈钢及耐热钢在不同热处理状态下的室温力学性能如表 4.5-2 所示。

从表 4.5-2 中可以看出，奥氏体不锈钢及耐热钢的综合力学性能最好，不仅有足够的强度，其塑性和韧性都相当高，硬度不高，冷热加工都比较容易。其次奥氏体钢还有良好的低温力学性能，基本上不存在脆性转变，仅随温度的降低，冲击值稍有降低。例如 18-8 型奥氏体不锈钢在很低温度下仍保持有足够的塑性和韧性，如在液氮温度（-196℃）下，冲击吸收功可达 392 J；在液氢温度（-253℃）下有阻止应力集中部位发生脆性破裂的能力；甚至在液氦温度（-269℃）下仍有足够高的冲击韧性值。因此，奥氏体不锈钢常被用作制造深冷设备材料。但是奥氏体不锈钢中如果含有少量铁素体，将会大大降低其低温力学性能。

表 4.5-2　不锈钢的力学性能

类　型	牌　号	热处理状态	拉伸试验			硬度试验			弯曲试验 180° 弯心半径 d 钢板厚度 a
			$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ_5/%	HBS	HRB	HV	
奥氏体型	1Cr17Mn6Ni5N	固溶处理	≥425	≥635	≥40	≤241	≤100	≤253	—
	1Cr18Mn8Ni5N		≥245	≥590	≥40	≤207	≤95	≤218	—
	2Cr13Mn9Ni4			≥635	≥40				—
	1Cr17Ni7		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	—
	1Cr17Ni8		≥205	≥570	≥45	≤187	≤90	≤200	—
	1Cr18Ni9		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	—

续表 4.5-2

类　型	牌　号	热处理状态	拉伸试验			硬度试验			弯曲试验 180° 弯心半径 d 钢板厚度 a
			$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ_5/%	HBS	HRB	HV	
奥氏体型	1Cr18Ni9Si3	固溶处理	≥205	≥520	≥40	≤207	≤95	≤218	—
	0Cr18Ni9		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	—
	00Cr19Ni10		≥177	≥480	≥40	≤187	≤90	≤200	—
	0Cr19Ni9N		≥275	≥550	≥35	≤217	≤95	≤220	—
	0Cr19Ni10NbN		≥345	≥685	≥35	≤250	≤100	≤260	—
	1Cr18Ni12		≥177	≥480	≥40	≤187	≤90	≤200	—
	0Cr23Ni13		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	—
	0Cr25Ni20		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	—
	0Cr17Ni12Mo2		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	—
	00Cr17Ni14Mo2		≥177	≥480	≥40	≤187	≤90	≤200	—
	0Cr17Ni12Mo2N		≥275	≥550	≥35	≤217	≤95	≤200	
	00Cr17Ni13Mo2N		≥245	≥550	≥40	≤217	≤95	≤200	
	1Cr18Ni12Mo2Ti		≥205	≥530	≥35	≤187	≤90	≤200	
	1Cr18Ni12Mn3Ti		≥205	≥530	≥35	≤187	≤90	≤200	
	1Cr18Ni9Ti		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	
	0Cr18Ni12Mo2Ti		≥205	≥530	≥35	≤187	≤90	≤200	
	0Cr18Ni12Mo3Ti		≥205	≥530	≥35	≤187	≤90	≤200	
	0Cr18Ni12Mo2Cu2		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	
	00Cr18Ni14Mo2Cu2		≥177	≥480	≥40	≤187	≤90	≤200	
	0Cr19Ni13Mo3		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	
	00Cr19Ni13Mo3		≥177	≥480	≥40	≤187	≤90	≤200	
	0Cr18Ni16Mo5		≥177	≥480	≥40	≤187	≤90	≤200	
	0Cr18Ni10Ti		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	
	0Cr18Ni11Nb		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	
	0Cr18Ni13Si4		≥205	≥520	≥40	≤207	≤90	≤218	
	2Cr13Ni13		≥205	≥560	≥40	≤201	≤95	≤210	
	2Cr25Ni20		≥205	≥590	≥35	≤201	≤95	≤210	
	1Cr16Ni35		≥205	≥560	≥35	≤201	≤95	≤210	
	0Cr25Ni20		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	
	1Cr20Ni14Si2		—	≥590	≥40	—	—	—	
	1Cr25Ni20Si2		—	≥540	≥35	—	—	—	
	0Cr15Ni25Ti2MoAlVB		—	≥725	≥25	≤192	≤91	≤202	
		时效	≥590	≥900	≥15	≤248	≤101	≤261	
奥氏体铁素体型	00Cr18Ni5Mo3Si2	固溶处理	≥390	≥590	≥20	—	HRC≤30	≤300	
	0Cr26Ni5Mo2		≥390	≥590	≥18	≤277	HRC≤29	≤292	
	0Cr18Ni11Si4AlTi		—	≥715	≥30	—	—	—	
	1Cr21Ni5Ti		—	≥635	≥20	—	—	—	
铁素体型	0Cr13Al	退火处理	≥175	≥410	≥20	≤183	≤88	≤200	$a<8$ mm，$d=a$ $a>8$ mm，$d=2a$
	00Cr12		≥190	≥360	≥22	≤183	≤88	≤200	$d=2a$
	1Cr15		≥205	≥450	≥22	≤183	≤88	≤200	$d=2a$



续表 4.5-2

类型	牌号	热处理状态	拉伸试验			硬度试验			弯曲试验 180° 弯心半径 d 钢板厚度 a
			$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ_5/%	HBS	HRB	HV	
铁素体型	1Cr17	退火处理	≥205	≥450	≥22	≤183	≤88	≤200	$d=2a$
	00Cr17		≥175	≥365	≥22	≤183	≤88	≤200	$d=2a$
	1Cr17Mo		≥205	≥450	≥22	≤183	≤88	≤200	$d=2a$
	00Cr17Mo		≥245	≥410	≥20	≤217	≤96	≤230	$d=2a$
	00Cr18Mo2		≥245	≥410	≥20	≤217	≤96	≤230	$d=2a$
	00Cr30Mo2		≥295	≥450	≥22	≤209	≤95	≤220	$d=2a$
	00Cr27Mo		≥245	≥410	≥22	≤190	≤90	≤200	$d=2a$
	0Cr11Ti		≥175	≥365	≥22	≤162	≤80	≤175	$a<8$ mm，$d=a$ $a>8$ mm，$d=2a$
	2Cr25N		≥275	≥510	≥20	≤201	≤95	≤210	
	1Cr19Al3		≥245	≥440	≥15	≤210	≤95	≤220	—
马氏体型	1Cr12	退火处理	≥205	≥440	≥20	≤200	≤93	≤210	$d=a$
	0Cr13		≥205	≥410	≥20	≤200	≤93	≤210	$d=2a$
	1Cr13		≥205	≥440	≥20	≤183	≤88	≤200	$d=2a$
	2Cr13		≥225	≥520	≥18	≤223	≤97	≤234	—
	3Cr13		≥225	≥540	≥18	≤235	≤99	≤247	—
	4Cr13		≥225	≥590	≥15	—	—	—	—
	3Cr16		≥225	≥520	≥18	≤241	≤100	≤253	—
	7Cr17		≥245	≥590	≥15	≤255	HRC≤25	≤269	—
	1Cr17Ni2	退火	—	≥1 080	≥10	—	—	—	—
	0Cr17Ni7Al	固溶	≤380	≤1 030	≥20	≤192	≤92	≤200	
		565℃时效	≥960	≥1 140	$a<3.0$ mm 时，≥3.0；$a>3.0$ mm 时，≥5.0		HRC≥35	≥345	
		510℃时效	≥1 030	≥1 230	$a<3.0$ mm 时,不作规定；$a>3.0$ mm 时，≥4.0		HRC≥40	≥392	

奥氏体不锈钢不仅具有优良的低温力学性能，而且具有优良的高温性能。例如18-8型奥氏体不锈钢在900℃氧化性介质中和在700℃还原性介质中，都能保持其化学稳定性，以及足够高温强度，因此，也可以作为耐热钢作用。1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢的高温力学性能如表4.5-3所示。

表 4.5-3　1Cr18Ni9Ti 钢的高温力学性能

钢号	温度/℃	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%	A_{KV}/J·cm^{-2}
1Cr18Ni9Ti	20	235	559	69	79	274
	600	176	363	31	62	294
	650	127	353	34	65	284
	700	127	353	20	58	313

从表4.5-2中还可以看出，马氏体不锈钢在退火状态下强度和硬度都不高，但通过淬火处理可大幅度提高其强度和硬度。正常使用状态为调质状态，这种状态下马氏体钢具有较好的综合力学性能。马氏体不锈钢和铁素体不锈钢在常温下的冲击值均比奥氏体不锈钢低，另外，铁素体不锈钢在高温下容易发生高温脆化，包括475℃脆化、σ相析出脆化以及粗晶脆化。在低温下，马氏体不锈钢和铁素体不锈钢的冲击值均很低，无法使用。

1.4　不锈钢的物理性能

几种典型不锈钢的物理性能数据列于表4.5-4，为了对比，表中同时也列出了碳素钢的物理性能数据。

从表4.5-4可以看出，马氏体、铁素体不锈钢比碳钢的的密度稍低，而奥氏体不锈钢的密度比碳素钢稍高；不锈钢的电阻率比碳素钢高得多，其中奥氏体不锈钢的电阻率约为碳素钢的5倍，这在电弧焊时容易使焊条或焊丝发热；铁素体、马氏体不锈钢的比热容比碳素钢稍低，奥氏体不锈钢的比热容和碳素钢基本一致；铁素体、马氏体不锈钢的线膨胀系数和碳素钢比较接近，而奥氏体不锈钢的线胀系数比碳素钢要高约40%左右，并且随着温度的提高，差距更大，因此，奥氏体不锈钢焊接时将会产生更大的应力和变形。不锈钢的导热率普遍比碳素钢低，约为碳素钢的1/3，这也是引起焊接材料发热的另一个原因。

一般情况下奥氏体不锈钢无磁性，而铁素体、马氏体不锈钢有磁性。但奥氏体不锈钢中如果含有少量铁素体，或者奥氏体不锈钢在冷加工时由于变形量较大，会产生变形诱导马氏体，也会使奥氏体不锈钢呈现有弱磁性。

总之，不锈钢和碳素钢相比，在物理性能上有较大的差异。



表 4.5-4　几种典型不锈钢的物理性能

类型	钢号	物理性能				平均线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$					热导率/W·(m·K)$^{-1}$		纵向弹性模量
		密度/g·cm^{-3}	电阻率/μΩ·cm	磁性	比热容(0~100℃)/kJ·(kg·K)$^{-1}$	0~100	0~316	0~538	0~649	0~816	100℃	500℃	10^3 MPa
碳素钢	Q235	7.86	15	有	0.50	11.4	11.5	—	—	—	46.89	—	205.9
铁素体不锈钢	0Cr13Al	7.75	60	有	0.46	—	—	—	—	—	27.00	—	200.1
	1Cr17	7.70	60	有	0.46	10.4	11.0	11.3	11.9	12.4	26.13	26.29	200.1
马氏体型不锈钢	1Cr13	7.75	57	有	0.46	9.9	10.1	11.5	11.7	—	24.91	28.72	200.1
	1Cr12	7.75	57	有	0.46	9.9	10.1	11.5	11.7	—	24.91	28.00	200.1
	2Cr13	7.75	55	有	0.46	—	—	—	—	—	24.91	—	200.1
	1Cr17Ni2	7.75	72	有	0.46	11.7	12.1	—	—	—	20.26	—	200.1
奥氏体型不锈钢	1Cr17Ni8	7.93	72	无	0.50	16.9	17.1	18.2	18.7	—	16.29	21.48	193.2
	1Cr18Ni9	7.93	72	无	0.50	17.3	17.8	18.4	18.7	—	16.29	21.48	193.2
	0Cr18Ni9	7.93	72	无	0.50	16.3	17.8	18.4	18.7	—	16.29	21.48	193.2
	0Cr18Ni10Ti	7.93	72	无	0.50	16.7	17.1	18.5	19.3	20.2	15.95	22.15	193.2
	0Cr18Ni11Nb	7.98	73	无	0.50	16.7	17.1	18.5	191	20.0	15.95	22.15	193.2
	0Cr17Ni12Mo2	7.98	74	无	0.50	16.0	16.2	17.5	18.5	20.0	16.29	21.48	193.2
	0Cr23Ni13	7.98	78	无	0.50	14.9	16.7	17.3	18.0	—	14.19	18.67	200.1
	0Cr25Ni20	7.98	78	无	0.50	14.4	16.2	16.9	17.5	—	14.19	18.67	200.1

1.5　不锈钢的耐蚀性能

金属的腐蚀一般可分为物理腐蚀、化学腐蚀、电化学腐蚀、生化腐蚀和应力腐蚀等多种形式。物理腐蚀是指金属单纯的物理溶解过程；化学腐蚀是指金属和介质中的原子或离子直接产生的化学反应；电化学腐蚀是指金属在电解液中产生的阳极溶解过程；生化腐蚀是金属在微生物作用下产生的一种腐蚀过程；应力腐蚀是指金属在应力和腐蚀介质联合作用下的腐蚀破裂过程。

金属腐蚀还可以分为整体均匀腐蚀、局部腐蚀和应力腐蚀破裂等形式。局部腐蚀常见的有晶间腐蚀、点蚀和缝隙腐蚀等多种形式。应力腐蚀破裂还可以分阳极溶解型应力腐蚀破裂和阴极环境氢脆破裂等形式。

不锈钢一般情况下具有优良的抗均匀腐蚀的能力。但在不同介质环境中抗腐蚀能力不一样。通常不锈钢在氧化性介质环境中的抗腐蚀性能要比在还原性介质环境中强。

(1) 均匀腐蚀

均匀腐蚀是指接触腐蚀介质的金属表面产生的均匀腐蚀使厚度减薄的现象。评定均匀腐蚀的标准是腐蚀速率，即单位面积上单位时间内的失重量［g/（m^2·a)］或单位时间的腐蚀深度（mm/a)。根据腐蚀速率可将金属材料的耐蚀性分为10级，如表4.5-5所示。

根据不同工况条件对钢耐蚀性指标的不同要求，耐蚀钢一般可分为两大类。

一类是不锈钢，指在大气及弱腐蚀性环境中的耐蚀钢。当在这类环境中的腐蚀速率小于0.01 mm/a时，认为是完全耐蚀；当腐蚀速率小于0.1 mm/a时，认为是耐蚀。

一类是耐蚀钢，指在各种强腐蚀介质环境中的耐蚀钢。当其腐蚀速率小于0.1 mm/a时，认为是完全耐蚀，当腐蚀速率小于1 mm/a时，认为是耐蚀。

表 4.5-5　金属材料耐蚀性分级

分类	腐蚀速率/mm·a^{-1}	级别	分类	腐蚀速率/mm·a^{-1}	级别
耐蚀性极强	<0.001	1	耐蚀性较弱	0.10~0.50	6
耐蚀性很强	0.001~0.005	2		0.50~1.00	7
	0.005~0.010	3	耐蚀性弱	1.00~5.00	8
耐蚀性强	0.010~0.05	4		5.00~10.00	9
	0.05~0.10	5	耐蚀性极弱	>10	10

在不锈钢中，合金元素Cr对于抗腐蚀性能起到了决定性的作用。一方面，随着含铬量的提高，钢的表面能生成一层致密的富铬氧化物膜，该氧化膜将阻止金属的离子化而起到钝化作用；另一方面，钢中铬含量每提高1/8时，钢的电极电位将发生跳跃性的提高，例如钢中的铬含量提高到12.5%时，钢的电极电位就由原来的 -0.56 V跳跃到 +0.2 V。当铬的含量提高到25%时，电极电位又会发生另一次跳跃。钢中的合金元素对抗腐蚀性能的影响，如图4.5-2所示。

从图4.5-2中可以看出，在氧化性酸中，如HNO_3，Cr、V、Si能提高钢的耐蚀性；在还原性酸中，如HCl、H_2SO_4，Ni对钢的耐蚀性有利；对于H_2SO_4，Cu的作用最好，Mo的含量在2%~3%时，在各类酸中，特别是在还原性酸中，能比较明显地改善钢的耐蚀性。

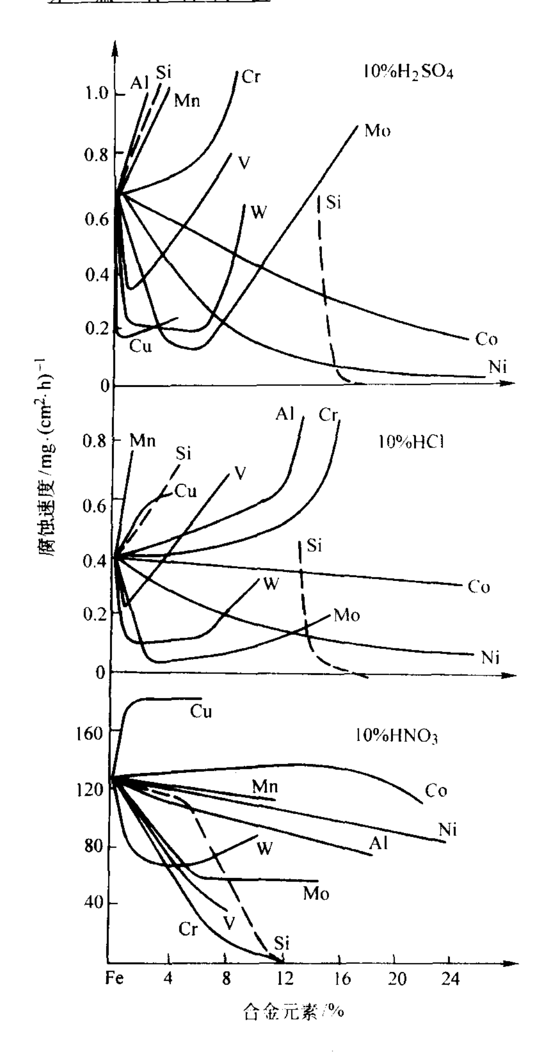


图 4.5-2 合金元素对铁的耐蚀性的影响

(2) 晶间腐蚀

晶间腐蚀是金属在腐蚀介质环境中由表面沿晶界向金属内部深入腐蚀的--种现象。严重的情况下，将导致晶粒间的结合力全部丧失。

产生晶间腐蚀的原因是多方面的，但多数人认为是由于奥氏体不锈钢在 450 ~ 850℃敏化温度区间重复加热，使过饱和的固溶碳迅速地向晶界扩散，并与和碳的亲合力很强的铬形成铬的碳化物，如 $Cr_{23}C_6$ 或 $(Cr, Fe)_{23}C_6$，而此时铬的扩散速度比碳要低得多，因而导致沿晶周围的铬迅速降低到 12.5%以下的所谓贫铬区。并使该区失去钝化能力，同时使该区的电极电位发生跳跃式降低，致使该区丧失抗腐蚀能力。

奥氏体不锈钢产生晶间腐蚀倾向及其敏化温度区间与钢中的含碳量有关，图 4.5-3 为 18-8 型奥氏体不锈钢产生晶间腐蚀倾向的敏化温度区间与含碳量的关系。从图中可以看出，含碳量越低，产生晶间腐蚀倾向的敏化温度区间越窄，并且产生晶间腐蚀倾向的孕育期也越长。原则上讲，当碳的含量低于奥氏体钢在室温下的溶解度 0.02% ~ 0.03%时，就有可能避免产生晶间腐蚀。另外，当奥氏体不锈钢中含有稳定碳的合金元素 Ti、Nb 等时，会大大降低其晶间腐蚀倾向。

铁素体不锈钢也会产生晶间腐蚀但敏化温度区间随钢种而异，例如 Cr17 不锈钢的敏化温度约为 1 100 ~ 1 200℃。

此外，也有人认为 σ 相在晶界上析出而产生的选择性腐蚀也是产生晶间腐蚀的原因之一，特别是用来解释某些超低碳奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢的晶间腐蚀，还是有一定说服力的。也有人认为是晶界杂质偏析，特别是磷和高密度位错而引起晶间腐蚀。

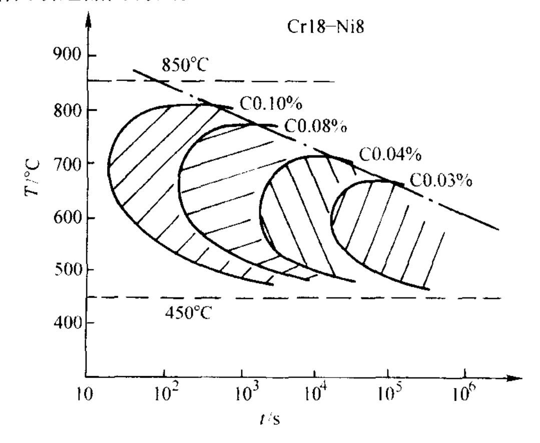


图 4.5-3 钢的晶间腐蚀敏感温度-时间曲线

(3) 点蚀、缝隙腐蚀

点蚀是指金属表面大部分未发生腐蚀或腐蚀比较轻微，而局部某些点发生尺寸不大于 1.0 mm 的腐蚀坑，通常腐蚀坑的深度大于其直径，严重的情况可形成隧道甚至穿孔，这种情况有时也称为隧道腐蚀。

产生点蚀的原因首先是由于材料表面的钝化膜受到局部破损，或者是由于材质不均匀，如杂质、偏析及其他一些缺陷，而形成腐蚀坑，由于腐蚀坑的存在，使腐蚀坑的腐蚀介质逐步浓缩而形成所谓浓差电池，进一步加速了坑蚀，最后形成闭塞电池，使腐蚀不断深入形成孔蚀或隧道腐蚀。

不锈钢在含有 Cl^- 离子的介质中容易发生点蚀。因此减少介质中 Cl^- 离子的浓度，或加入含 CN^-、NO_3^-、SO_4^{-2} 的缓蚀剂，提高 Cr 的含量，降低碳的含量，或加入适量的 Mo、Mn、Si、V、稀土元素，减少杂质和偏析等都有利于提高抗点蚀性能。

缝隙腐蚀是指金属构件在缝隙处发生的斑点状或溃疡形的宏观腐蚀坑。通常发生在垫圈、铆接、螺钉连接、搭接接头、阀座、堆积的金属片间等处。部分奥氏体不锈钢、铁素体及马氏体不锈钢在海水中均有不同程度的缝隙腐蚀倾向。

产生缝隙腐蚀的原因是由于在缝隙处的介质逐步产生局部浓缩，使缝隙处的介质和整体介质之间产生了浓差电池，发生闭塞电池腐蚀。

点蚀和缝隙腐蚀的不同之处是：点蚀是由于金属表面的局部钝化膜的破损或某些杂质、缺陷露头而引起的微观腐蚀到宏观腐蚀；而缝隙腐蚀是由于缝隙处的介质浓差引起的宏观腐蚀。

适当地增加不锈钢中的铬、钼含量，可以提高钢的抗缝隙腐蚀的能力，在海水中，只有采用钛、高钼镍基合金和铜合金才能有效地防止缝隙腐蚀的发生。

(4) 应力腐蚀破裂

应力腐蚀破裂是指金属材料在一定应力作用下，在特定的腐蚀环境中，产生的低应力脆性破裂现象。也就是说，应力腐蚀破裂是金属材料在应力和腐蚀介质的联合作用下产生的一种特殊破坏形式。产生应力腐蚀破裂的应力水平往往低于材料的屈服点，且破裂前不产生任何塑性变形。例如，在含有 Cl^- 离子的介质中，引起铬镍奥氏体不锈钢产生应力力破裂的临界应力值小于 19.6 N/mm²。所以，应力腐蚀破裂是一种极其危险的破坏形式。

应力腐蚀破裂过程包括三个阶段：腐蚀坑的形成、裂纹的萌生及亚临界扩展、失稳断裂。

影响不锈钢应力腐蚀破裂的因素很多，归纳起来有以下



三方面的因素。

1）介质环境因素　不锈钢产生应力腐蚀破裂最敏感的是含 Cl^- 离子的腐蚀介质，并且 Cl^- 离子浓度越大，温度越高，应力腐蚀破裂的敏感性也越大；其次是含有 OH^- 离子的腐蚀介质，对不锈钢，尤其是铁素体不锈钢的应力腐蚀破裂比较敏感；此外，硫酸、有机酸、氨水、海水、高温水、H_2S 等也能引起不锈钢的应力腐蚀破裂。

2）金属材料的物理冶金因素　不锈钢的应力腐蚀破裂还与其冶炼方式、合金成分、热处理状态、组织、表面状况、加工情况等因素有关。例如，有试验表明，对于奥氏体不锈钢而言，碳、硅等元素对于抗应力腐蚀破裂是有利的，锰、氮、磷、硫等元素是有害的，铬、镍、钼、铜等对应力腐蚀破裂的影响不是线性关系，如 Cr < 20%、Ni < 5%、Mo < 1.5% 的情况下，随着合金元素的增加对抗应力腐蚀破裂是有害的，但随着合金元素的进一步增加，则对抗应力腐蚀破裂是有益的。晶粒尺寸增加，应力腐蚀破裂的敏感性也增加。不锈钢表面采用机械打磨时，对抗应力腐蚀破裂是不利的，而电解抛光是有利的，因为这时表面可生成较厚的钝化膜。冷加工变形时，在变形量小于 20% 时，随着变形量的增加，应力腐蚀破裂的敏感性增加，而当变形量进一步增加时，应力腐蚀破裂的倾向反而减小。特别是对于亚稳定型奥氏体不锈钢，过大的变形量能促使马氏体转变，产生电化学防护作用。

对于 18-8 型亚稳定奥氏体不锈钢，百分之几到十几的铁素体对抗应力腐蚀破裂是有益的；对于高铬铁素体不锈钢的 σ 相、碳化物及氮化物沿晶界析出以及粗晶等，都会严重影响钢的抗应力腐蚀破裂性能；马氏体不锈钢中的铁素体对抗应力腐蚀破裂是不利的。

3）应力的因素　一般说来，承受拉应力水平越高，应力腐蚀破裂的倾向性就越大，当应力水平低于某一临界值时，就不会产生应力腐蚀破裂，或者应力腐蚀裂纹就不会继续扩展，该应力称为应力腐蚀破裂的临界应力，常用 σ_{SCC} 表示。

通常情况下，三向应力对应力腐蚀破裂的敏感性比平面应力大；同样，平面应力比单轴应力对应力腐蚀破裂的敏感性要大；应力集中程度越高，越容易发生应力腐蚀破裂；动载比静载更容易产生应力腐蚀破裂，在交变载荷作用下产生的应力腐蚀破裂又称为腐蚀疲劳。

特别值得注意的是在冷热加工后的残余应力，尤其是焊接残余应力，往往是引起应力腐蚀破裂的重要因素。

不锈钢的应力腐蚀破裂在整个腐蚀破裂中占有很大的比例，据有关统计表明，在不锈钢的各类腐蚀破坏中，应力腐蚀破裂约占 49.3%，其中氯化物引起的应力腐蚀破裂占 80% 以上，点蚀、孔蚀、缝隙腐蚀占 23.0%，晶间腐蚀约占 9.5%，腐蚀疲劳约占 9.2%，均匀腐蚀约占 9.0%。

1.6　不锈钢的耐热性能

（1）热安定性

热安定性是指不锈钢在高温下抗氧化及耐气体介质腐蚀的性能。一般在钢中加入足够量的 Cr、Al、Si 等合金元素，能使钢的表面生成一层致密而牢固的氧化膜，如 Cr_2O_3、Al_2O_3 等，阻止金属进一步氧化。例如，若单独用铬来提高钢的抗氧化性能时，当铬的含量达到 12% 时，抗氧化的温度可达 800℃；当铬的含量达 20% 时，抗氧化的温度可达 950℃；当铬的含量达到 28% 时，抗氧化的温度可达 1 100℃。如果单独用铝来提高钢的抗氧化性能，铝的含量达 3% ~ 4% 时，抗氧化的温度可达 900℃。单独加入硅 2% ~ 3% 时，可使抗氧化的温度达到 900 ~ 1 000℃。综合使用上述合金元素，可以获得更好的抗氧化性能。但是钢中加入铬，不仅可以提高抗氧化性能，而且可以使钢获得较好的综合力学性能。所以不锈钢主要是依靠铬来提高钢的抗氧化性能。其次，Cr_2O_3 氧化膜具有优良的抗温度剧变的能力，也就是抗热疲劳的能力最佳。

（2）热强性

不锈钢的热强性指在高温下有足够的强度。高温强度的指标主要有蠕变极限、持久强度以及高温短时强度。

通常的情况下，随着温度的提高，金属材料抗塑变能力及抗断裂能力也随之降低，主要原因有：一是温度提高使金属原子间的结合力降低，扩散增强，容易发生回复和再结晶，晶粒粗大，发生第二相聚集长大，以及亚稳定组织向稳定组织转变，使金属发生软化；二是温度提高有利于晶界扩散变形及晶界滑移，使晶间结合力降低，导致晶间断裂，使整体金属材料抗塑变能力降低。

从显微组织看，奥氏体不锈钢比铁素体不锈钢具有更高的热强性。这是因为奥氏体的面心立方点阵比较紧密，原子的扩散速度比较小，不易产生再结晶、第二相聚集速度比较慢，因而热强性较好。

为了提高钢的热强性，在冶金上主要采取以下一些措施。

① 采用 Mo、W 等固溶强化，提高原子间的结合力。

② 形成稳定的第二相、主要是碳化物相，如 MC、M_6C、$M_{23}C_6$ 等，提高高温强度，为此，可适当地提高钢的含碳量，同时加入强碳化物形成元素，如 Nb、V 等，以形成稳定的不易分解的碳化物强化相。

③ 减少晶界和强化晶界，控制晶粒长大，加入适量的硼和稀土元素等。

（3）高温脆化

不锈钢在热加工过程中或长期高温工作中，有可能产生脆化现象，主要脆化现象如下。

1）475℃脆化　主要是指含铬量大于 15% 的铁素体不锈钢，或含铁素体较多的不锈钢，在 400 ~ 600℃温度区间长时间加热并缓冷，导致钢在常温或负温时出现脆化现象。产生 475℃脆化的原因，通常认为是高铬铁素体不锈钢内部的铬发生重新分配形成微质点，导致晶格畸变而使金属硬化的现象。也有人认为 475℃脆性是由于 α' 相的析出而导致脆化。实验表明，杂质增多或添加 Mo、Ti 等铁素体形成元素，都能促进 475℃脆性。

已产生 475℃脆性的钢，经 600 ~ 700℃加热，保温 1 h 后空冷，可以消除其脆性。

2）σ 相析出脆化　σ 相是一种硬脆而无磁性的金属间化合物。在不锈钢中，主要是 Fe 和 Cr 金属间化合物，实际上是一种成分不定的间隙相。一般在 500 ~ 900℃长时间加热时，有利于 σ 相的形成。σ 相可能直接产生于铁素体 δ 相，即 $\delta \to \sigma$；也可能从奥氏体 γ 转变而成，即 $\gamma \to \alpha \to \sigma$，$\alpha$ 为次生铁素体；也可能直接由奥氏体产生，即 $\gamma \to \sigma$。试验表明，存在铁素体相时，特别有利于 σ 相的形成，这是因为富铬的铁素体有利于铬的扩散。凡是铁素体形成元素均能促使 σ 相的形成。

σ 相本身的硬度高达 HRC68 以上，而且多半分布在晶界处，不但降低了材料的塑性和韧性，而且增大了晶间腐蚀的倾向。

加热温度提高到超过 σ 相稳定存在的上限温度时，σ 相可重新分解重熔。对于 18-8 型不锈钢，此上限温度约为 700℃左右；25-20 型不锈钢为 980℃左右。

3）粗晶脆化　晶粒严重长大，会使金属材料的塑性、韧性降低。单相组织的奥氏体、铁素体、马氏体不锈钢，加热到高温时都有晶粒长大的趋势。

4）回火脆化　有些不锈钢具有回火脆性倾向，例如 Cr13 型不锈钢，在 550℃附近加热会出现回火脆性现象。



1.7　不锈钢的组织

通常情况下，钢的组织取决于化学成分和热处理状态，但是，实际工程中情况要复杂得多。为了能根据金属材料的成分初步估算出其组织，特别是在焊接条件下，能根据焊缝的成分估算焊缝的组织。经过许多人的努力，建立了成分组织图。1949年建立了舍夫勒（Schaeffler）组织图，如图4.5-4所示；1973年建立了德龙（Delong）组织图，如图4.5-5所示，以及美国WRC（焊接科学研究委员会）组织图，如图4.5-6所示。

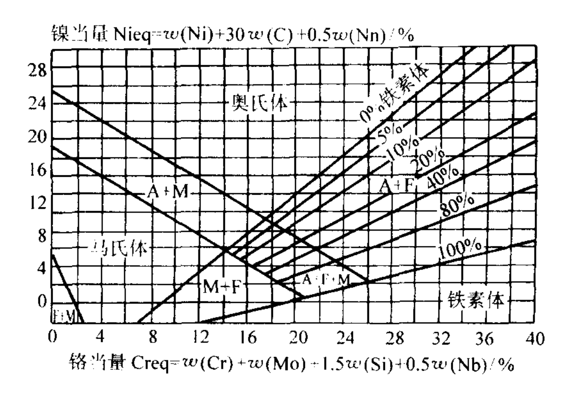


图4.5-4　舍夫勒组织图

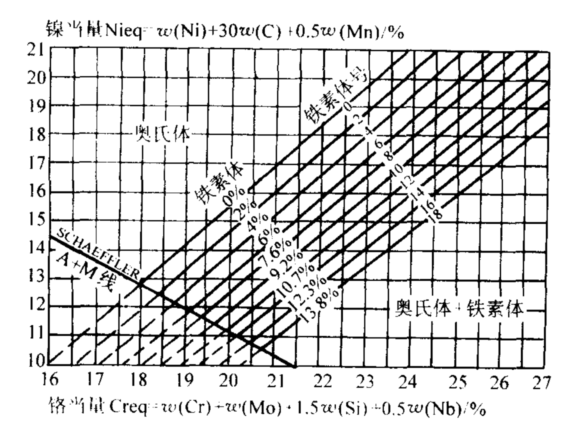


图4.5-5　德龙组织图

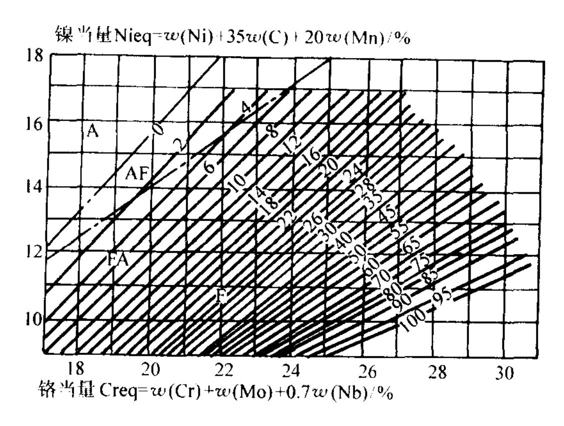


图4.5-6　WRC组织图

合金元素对钢组织的影响及其程度，基本上可以分为两类：一类是扩大奥氏体区，增加奥氏体稳定性的元素，又称奥氏体形成元素，有C、Ni、Mn、N、Cu等，常用镍当量$[Ni]_{eq}$来表示；另一类是缩小奥氏体区、甚至封闭奥氏体区的元素，又称铁素体形成元素，有Cr、Al、Ti、V、Si、Zr、Nb、W、Mo等，常用铬当量$[Cr]_{eq}$来表示。

$[Ni]_{eq}$和$[Cr]_{eq}$的计算公式如表4.5-6所示。

Delong组织图和WRC组织图都是对Schaeffler组织图的补充。Schaeffler组织图不仅可以根据焊缝的化学成分估算出焊缝焊后的组织，而且可以估算焊缝所需的组织、设计、选择焊接材料的成分。

表4.5-6　铬、镍当量计算公式

Schaeffler图	$w_{[Cr]eq}=w_{[Cr]}+w_{[Mo]}+1.5w_{[Si]}+0.5w_{[Nb]}$
	$w_{[Ni]eq}=w_{[Ni]}+30w_{[C]}+0.5w_{[Mn]}$
Delong图	$w_{[Cr]eq}=w_{[Cr]}+w_{[Mo]}+1.5w_{[Si]}+0.5w_{[Nb]}$
	$w_{[Ni]eq}=w_{[Ni]}+30w_{[C]}+30w_{[N]}+0.5w_{[Mn]}$
WRC图	$w_{[Cr]eq}=w_{[Cr]}+w_{[Mo]}+0.7w_{[Mn]}$
	$w_{[Ni]eq}=w_{[Ni]}+35w_{[C]}+20w_{[N]}$

2　不锈钢的焊接性

总的说来，不锈钢的焊接性还是比较好的，特别是近几年来，不断降低不锈钢的含碳量，同时采用微合金来维持和提高不锈钢的综合性能，使不锈钢的焊接性不断得以提高。

不同类型的不锈钢焊接时出现的主要问题不同，除了一般焊接时容易出现的冶金缺陷和工艺缺陷外，不锈钢在熔化焊时容易出现的问题归纳起来有以下几方面。

2.1　焊接接头的耐蚀性

焊接接头的腐蚀破坏形式主要有：焊缝的均匀腐蚀、热影响区的集中腐蚀、焊接接头的点蚀、焊缝及热影响区的晶间腐蚀、熔合区的刀状腐蚀、焊接接头的应力腐蚀破裂等。

（1）焊接接头的晶间腐蚀

焊接接头的晶间腐蚀包括焊缝的晶间腐蚀和热影响区的晶间腐蚀。晶间腐蚀常出现在奥氏体不锈钢，特别是18-8型奥氏体不锈钢的焊接中，铁素体不锈钢焊接时，接头也会出现晶间腐蚀现象。

焊缝的晶间腐蚀有两种情况：一是焊态下产生晶间腐蚀；一是焊后焊缝经敏化温度区重复加热后产生的晶间腐蚀。焊缝产生晶间腐蚀的冶金因素是焊接过程中使焊缝的合金元素发生变化，其中主要是渗碳和铬的烧损，以及杂质的偏析；其次是过大的焊接线能量引起的粗晶；另外，多层多道焊时，后一道焊缝对前一道焊缝的"敏化处理"，也可能引起晶间腐蚀。

对于18-8型奥氏体不锈钢，防止焊缝晶间腐蚀的主要措施如下。

1）降低焊缝的含碳量，选择合适的超低碳不锈钢焊接材料，为保证获得超低碳不锈钢焊缝，要求焊接材料的含碳量小于0.03%。

2）在焊缝中加入一定量的稳定化元素，如Ti、Nb等、焊缝中稳定化元素与碳的比值要求大于母材，通常为$\frac{w_{[Ti]}}{w_{[C]}-0.02}\geqslant 8.5\sim9.5$。

3）调整焊缝金属化学成分，使焊缝金属具有4%～12%的铁素体，由于高铬铁素体沿奥氏体晶界存在，因而就堵塞了沿奥氏体晶界的腐蚀通道。

4）采用较小的焊接线能量。

5）焊后进行固溶处理，如1Cr18Ni9Ti加热到920～1 150℃，然后快冷，使碳化物分解重溶及铬均匀化。

对于高铬铁素体不锈钢，其晶间腐蚀倾向要比亚稳定型奥氏体不锈钢小得多，防止焊缝晶间腐蚀的主要措施为：一



是尽可能降低焊缝金属中C和N的含量，例如，近几年研制的 $w_{[C]}+w_{[N]}\leqslant0.010\%$ 超高纯铁素体不锈钢，基本上就没有晶间腐蚀倾向；二是焊后进行700～850℃的退火处理，使铬重新均匀化。

热影响区晶间腐蚀，是由于在焊接热循环作用下，近焊缝区经历了相当于敏化温度热处理区域产生的晶间腐蚀。对于18-8型不锈钢相当于经历450～850℃，即焊接热循环的峰值温度为600～1 000℃的热影响区，对于铁素体不锈钢，相当于经历500～800℃敏化温度的热影响区。

防止热影响区晶间腐蚀的主要措施是尽可能缩短热影响区在敏化温度区间的停留时间，采用尽可能小的焊接线能量，焊接时尽量减小横向摆动，或者焊后进行热处理，对于奥氏体不锈钢焊后进行固溶处理，对于铁素体不锈钢焊后进行退火处理。

（2）熔合区的刀状腐蚀

沿熔合区发生宽度约为1.0～1.5 mm（最宽可达3～5 mm）的集中腐蚀，像刀切一样，通常称刀状腐蚀或简称刀蚀。

不同类型的钢产生刀蚀的情况不同，对于含稳定化元素Ti、Nb等奥氏体不锈钢，如1Cr18Ni9Ti、Cr18Ni12Mo3Ti等，刀蚀往往发生在熔合区的母材一侧。这是由于在焊接过程热循环的作用下，峰值温度超过1 200℃的过热区发生碳化物分解重熔的过程；而在冷却过程中，碳又开始向晶界扩散聚集，并在随后的敏化温度范围内，形成铬的碳化物，形成沿晶界的贫铬区，而产生晶间腐蚀，在这种情况下，刀蚀实际上是晶间腐蚀的一种特殊形式。

对于Cr17Ni2等双相不锈钢或铁素体不锈钢，发生刀蚀的原因是由于在焊接过程中，在焊接热循环的作用下，碳由固态母材向液态熔池扩散，并在熔合区的焊缝侧形成增碳层，并在腐蚀介质中发生增碳层的选择性腐蚀而形成刀蚀。

防止刀蚀的主要措施就是降低焊缝的碳含量，采用超低碳焊接材料，小的焊接线能量，以及焊后热处理；对于奥氏体不锈钢采用焊后固溶处理，对于铁素体不锈钢采用焊后退火处理。

（3）焊缝的均匀腐蚀和热影响区的集中腐蚀

产生这类腐蚀现象的主要原因是由于焊接材料选择不当。当焊缝金属的电极电位低于母材时，将会发生焊缝均匀腐蚀，反之将会发生近缝区母材的集中腐蚀。因此，在不锈钢焊接中选择焊接材料时，不仅要考虑到等强度原则，而且要求化学成分相近，要考虑等电位的原则。

（4）焊接接头的点蚀

焊接接头的点蚀，特别是焊缝的点蚀，与焊缝的杂质含量及其偏析有关，因此尽可能净化焊缝，采用较小的焊接线能量，防止粗晶，减少焊缝的工艺缺陷，十分必要。

（5）焊接接头的应力腐蚀破裂

引起焊接接头应力腐蚀破裂的重要原因之一是焊接残余应力，因此在接头设计时，要避免应力集中，避免出现交叉焊缝，避免强迫装配，避免出现未焊透、咬边等工艺缺陷，减少余高，合理的焊接顺序等都十分重要，另外，消除残余应力处理，包括焊后消除应力热处理，以及喷丸、锤击焊道、爆炸等处理，也都十分重要。

其次，不锈钢焊接接头的局部腐蚀，如晶间腐蚀、点蚀、坑蚀等，都会引发应力腐蚀破裂，因此，防止焊接接头局部腐蚀的措施，同样也是防止应力腐蚀破裂的措施。

2.2 焊接接头的热裂纹

（1）产生热裂纹的主要原因

焊接接头的热裂纹，包括结晶裂纹、液化裂纹、弧坑裂纹、高温失塑裂纹等都是在高温下产生的。在不锈钢的焊接中，奥氏体不锈钢，特别是稳定型奥氏体不锈钢的焊接，对结晶裂纹、液化裂纹比较敏感；马氏体不锈钢焊接对弧坑裂纹比较敏感；铁素体不锈钢焊接时，当发生高温脆化时，有可能产生高温失塑裂纹。

奥氏体不锈钢焊接时容易产生热裂纹的主要原因如下。

1）由于奥氏体不锈钢的热膨胀系数比较大，焊接时容易产生较大的残余应力，有足够产生热裂纹的力学条件。

2）奥氏体不锈钢焊接时，焊缝的柱状晶比较发达，晶粒比较粗大，方向性比较强，结晶时成分偏析比较严重。

3）奥氏体不锈钢焊接时，焊缝金属凝固时固液相区间比较大，特别是S、P、C、Nb、Mn等都是增大结晶温度区间的合金元素。

4）在奥氏体不锈钢焊缝中不可避免地存在能形成低熔点化合物和共晶体的合金元素和杂质。如S、P、Ni等，Ni_3S_2 的熔点是645℃，$Ni\text{-}Ni_3S_2$ 共晶体的熔点是625℃；Ni-P共晶体的熔点是880℃；FeS的熔点是980℃；Fe-P共晶体的熔点是1 050℃。

5）在不锈钢中存在众多只能形成有限固溶体的合金元素。例如，C、B、S、P、Si、Nb、Ti、Al等对Fe和Ni都是有限固溶合金元素。B在Fe及Ni中的固溶度接近于0；S在Fe中的固溶度为0.18%；P在Fe中的固溶度为2.8%；S、P在Ni中的固溶度接近于0。有限固溶体合金元素在不锈钢焊缝凝固过程中很容易形成偏析。

（2）防止热裂纹的主要措施

防止热裂纹的途径，对于18-8型奥氏体不锈钢来说，主要措施如下。

1）调整焊缝成分，造成有5%～8%的铁素体双相组织。少量铁素体的存在，至少可能起到以下作用。

① 可以细化晶粒，打乱奥氏体树枝柱状晶的方向，使低熔点物质不致于析集在少数奥氏体晶界上，而成为不连续的分散状态。

② 可以降低晶界的界面能，因为双相晶界的界面能总是小于单相晶界的界面能的。这就可以阻止低熔点液膜润湿展开，减小晶界低熔点共晶体和化合物的有害作用。

③ 高铬铁素体可以溶解较多的S、P等有害杂质，降低其有害作用，例如S在奥氏体中的溶解度只有0.05%，而在铁素体中的溶解度可达0.18%，后者是前者的3.5倍以上。

在18-8型奥氏体焊接时，焊缝中具有少量铁素体的双相组织，不仅可以有益地防止热裂纹，而且可以有效地防止焊缝的晶间腐蚀，是一举两得的冶金措施。

2）尽可能降低焊缝中对抗热裂十分有害的杂质和合金元素，如S、P、C等。特别是在铬镍奥氏体不锈钢中，由于Ni的存在，S、P的有害作用更加显著，因为一方面S、P和Ni能形成熔点很低的共晶体和化合物；另一方面S、P在Fe和Ni中的溶解度极低，更容易偏析。

碳不仅增加热裂倾向，而且增加晶间腐蚀倾向。

3）在焊接工艺上，防止过热，采用较小的焊接线能量，增大冷却速度，防止粗晶等都对防止热裂纹的产生有利。

对于稳定奥氏体不锈钢，如25-20型、15-36型等奥氏体不锈钢，其热裂倾向要比18-8型亚稳定奥氏体不锈钢大得多，但到目前为止还没有有效的防止措施，因为奥氏体不锈钢中，当Ni＞15%时，形成少量铁素体是不可能的，然而在这一方面，焊接工作者也做了不少的努力，主要如下。

① 尽可能降低焊缝中对抗热裂纹有害的元素，如S、P、Si等，试验证明：当Si/C≤5，S、P≤0.015%时，对防止热裂纹的产生是有利的。

② 适当地提高焊缝金属的含碳量，同时加入碳化物形成元素，造成焊缝金属的奥氏体、碳化物或硼化物双相组

织，不仅可以提高抗热裂纹性能，同时也不会损坏其高温性能。例如，14-18W2Nb 奥氏体不锈钢，当含碳量提高到 0.15%，Nb 的含量为 1.5%，使 Nb≈10C，并限制 Si 的含量，使 Nb/Si≈4.8，就可以有效地消除焊缝热裂纹。

前面已经分析到，硼在铁和镍中均不溶解，微量的硼就可能产生偏析，并且能与铁和镍形成低熔点共晶体：Fe-B 共晶的熔点为 1 149℃，Ni-B 共晶的熔点为 1 140℃。因此在钢中存在有万分之几的硼时，会使热裂倾向大大增加。如果使硼的含量进一步增加，使低熔点共晶体的数量增加，反而可以起到愈合作用，使热裂倾向显著降低，同时可以细化一次结晶组织。例如，在 25-20 不锈钢中加入 0.3% 的硼，在 14-18W2Nb 不锈钢中加 0.3%～0.35% 的硼，在 25-20Si 不锈钢中加入 0.4%～0.7% 的硼，均可有效地防止热裂纹。但是，硼的含量不得超过 0.8%～1.0%，否则将严重降低焊缝金属的韧性，并可能促使冷裂纹的产生。

③ 试验证明，适当提高奥氏体化元素，如 Mn、C、N 等的含量，有利于提高焊缝的抗热裂性能，如图 4.5-7 及图 4.5-8 所示。

从图 4.5-7 中可以看出，开始时随着含 Mn 量的增加，焊缝热裂倾向急剧降低，当 Mn 的含量增至 4%～6% 时，焊缝的热裂倾向最小，当 Mn 的含量继续增加 Mn＞7%，热裂倾向又有增加的趋势。

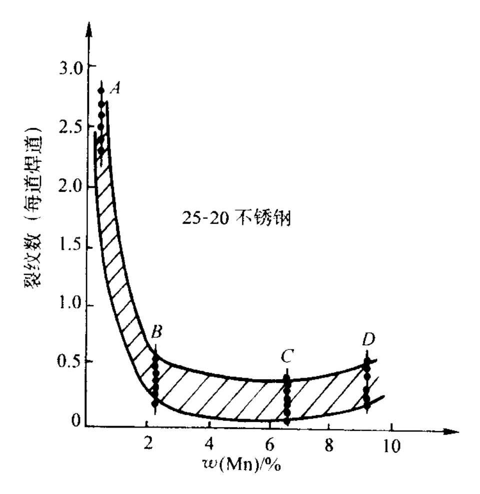


图 4.5-7 Mn 对焊缝热裂倾向的影响（25-20 不锈钢焊条电弧焊）

从图 4.5-8 可以看出，C 与 N 均能抑制 Si 的有害作用，这对于为满足热稳定性及铸造性要求一定含 Si 量的稳定奥氏体不锈钢来说，有一定的意义。例如，在含 Si 的 25-20 型奥氏体不锈钢的焊缝中当 $\frac{C}{\sqrt{Si}} \geq 0.22$ 时，可以防止热裂纹的产生。

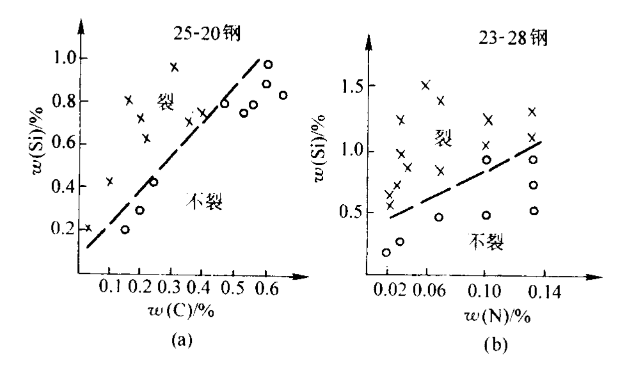


图 4.5-8 焊缝中碳或氮与硅共存时的抗裂效果

调整和控制焊缝合金组织及其相互比例关系，是控制焊缝热裂纹的重要方法，例如，在稳定奥氏体不锈钢焊缝中如果有 Cu，就不能提高 Mn 的含量，因为 Mn 与 Cu 共存将增大偏析而促使热裂倾向加大。

奥氏体不锈钢常用合金元素对热裂纹的影响如表 4.5-7 所示。

表 4.5-7 奥氏体不锈钢常用合金元素对热裂纹的影响

元素	亚稳定型奥氏体不锈钢	稳定型奥氏体不锈钢
Cr	提高抗热裂性，希望 Cr/Ni≈2.2～2.3	显著增大热裂倾向
Ni	显著增大热裂倾向	显著增大热裂倾向
Si	减少热裂倾向（≥1.5%～3.5%）	显著增大热裂倾向（≥0.3%～0.7%）
Mn	降低热裂倾向，若使 δ 相消失则增大热裂倾向	显著提高（4%～7%）
Ti	影响不大（≤1.0%）	显著增大热裂倾向，Ti/C≈6 时，降低热裂倾向
Nb	影响不大（≤1.2%），但易偏析，形成局部微裂	显著增大热裂倾向，当 Nb/C≈10 时可降低热裂倾向
Mo	有一定好处	强烈降低热裂倾向
V	提高抗裂性，当 V≤1.5% 时影响不大	稍增大热裂倾向，但也有相反结论
Al	降低热裂倾向	强烈增大热裂倾向
Cu	增大热裂倾向	Mn 极少时，影响不大；Mn≥2% 显著增大热裂倾向
C	增大热裂倾向	降低热裂倾向（0.3%～0.5%C，并同时有 Nb、Ti 等）

④ 严格控制焊接工艺规范，尽可能减小熔池过热及焊接应力，采用较小的焊接线能量等，有利于降低热裂倾向。

液化裂纹多发生在熔合区的母材侧，也可能发生在多层焊时层间熔合区。液化裂纹的本质也是由于晶界低熔点液膜造成。因此也属于热裂纹的范畴，所不同的是结晶裂纹是在焊缝冷却凝固过程形成的，而液化裂纹是在过热区的母材侧加热过程中形成的。

通常情况下，液化裂纹多发生在单相 25-20 型奥氏体不锈钢中，而具有双相的 18-8 型奥氏体不锈钢中比较少见。因为单相奥氏体钢的晶粒在加热时容易长大，例如加热到 1 350～1 360℃时，25-20 钢的晶粒尺寸要比 18-8 钢大 50%～60%，晶界液膜的熔点约为 1 355～1 360℃左右，比实际固相线 1 420℃要低 60～65℃。

减轻液化裂纹的根本措施是减少母材及焊缝中的有害杂质的含量，防止偏析与低熔点共晶物的形成。在焊接工艺上防止过热，减少晶粒长大程度，采用较小的焊接线能量等都有利于防止液化裂纹的产生。

2.3 焊接接头的冷裂纹

不锈钢焊接接头的冷裂纹多发生在马氏体和铁素体不锈钢焊接接头中，而奥氏体不锈钢焊接接头冷裂纹的敏感性极小，几乎不发生冷裂纹。

马氏体不锈钢的淬硬性是产生冷裂纹的主要原因之一，一般情况下，马氏体不锈钢在空冷的条件下就能转变成马氏体。如果钢中的含碳量较高，转变成高碳马氏体，则冷裂倾向就更大。另外，马氏体不锈钢在焊接时，过热区的晶粒容



易长大，产生粗晶脆化，以及一般马氏体不锈钢均有回火脆性倾向，因此在焊接热循环作用下引起的接头脆化也是产生冷裂纹的原因之一。

其次，由于马氏体不锈钢的导热性较差，焊接残余应力较大，如果工件的厚度较大，或接头的拘束度较大，是产生冷裂纹的又一个重要因素。例如，在电站建设中，用于主蒸汽管的厚壁1Cr12WMoV（即F11）马氏体不锈钢管，对冷裂纹就非常敏感。

铁素体不锈钢焊接时很容易引起接头脆化，特别是热影响区的粗晶脆化，也是产生冷裂纹的主要因素。此外，铁素体不锈钢焊接时残余应力大，以及氢在铁素体中的溶解度降低且扩散速度增大，也是引起冷裂纹的主要因素。

尽可能降低焊缝金属中扩散氢的含量、焊前预热及焊后去应力退火处理等一般的防止冷裂纹的工艺措施，在这时均适用。

2.4　焊接接头的脆化

通常焊接总会对材料的某些力学性能造成损伤，特别是铁素体不锈钢及马氏体不锈钢的焊接，常常会引起焊接接头的脆化，即使是奥氏体不锈钢的焊接也会或多或少地引起接头塑韧性的降低。引起焊接接头脆化的主要原因如下。

（1）粗晶脆化

铁素体不锈钢焊接时，在焊接热循环的作用下，当温度大于950℃时，热影响区的晶粒就会急剧长大，因而导致接头的塑性大幅度降低。铁素体不锈钢焊接时热影响区脆化还反映在脆性转变温度的提高，特别是不锈钢中C和N的含量增加时，脆性转变温度就有明显的提高。

马氏体不锈钢焊接时，同样也有热影响区的粗晶脆化问题。在焊接热循环的作用下，当温度大于1 150℃时，近缝区的晶粒也会严重长大。例如，1Cr13马氏体不锈钢焊接时，当冷却速度小于10℃/s时，近缝区会出现粗大的铁素体和碳化物组织，塑韧性显著降低，当冷却速度大于40℃/s时，会产生粗大的马氏体，也使塑韧性降低。

不锈钢焊接时，防止过热十分重要。

（2）475℃脆化

高铬铁素体不锈钢焊接时，在焊接热循环的作用下，经400～600℃温度区间加热的热影响区，在缓冷时，有可能产生475℃脆化，475℃脆化不仅与焊接工艺有关，而且与材料的杂质含量有关，杂质对475℃脆化有促进作用。钢中的Mo、Ti也会使475℃脆化倾向增大。

为了减小475℃脆化，应最大限度地提高母材及焊缝的纯度，尽可能避免在430～480℃区间的加热，以及减少在此温度区间的停留时间、控制焊接热循环特性及预热温度等都很重要。

通常在一般焊接条件下，由于加热速度和冷却速度都比较快，因而出现475℃脆化的可能性较小。

（3）σ相沉淀脆化

高铬铁素体不锈钢、铁素体马氏体和铁素体奥氏体双相不锈钢以及铁素体含量超过12%的亚稳定奥氏体不锈钢，在焊接热循环的作用下，有可能出现σ相析出脆化。但这种可能性较小，因为σ相析了过程比较缓慢，而焊接过程中加热和冷却速度都比较快。

3　不锈钢的焊接方法和焊接材料

3.1　不锈钢的焊接方法

（1）不锈钢焊接方法选择原则

一般说来，不锈钢的焊接性还是比较好的，目前生产中常用的一些焊接方法，大多适用于不锈钢的焊接。但不锈钢也有其固有的特点，在选择焊接方法时，应考虑以下一些原则。

1）由于不锈钢是属于高合金钢，其中有些合金元素，如Cr、Al、Ti等在焊接过程中很容易被烧损，因此在选择焊接工艺方法时，要求其有良好的保护性能，氧化性要低。

2）由于不锈钢的热导率低，约为低碳钢的1/2～1/3，电阻率较大，约为低碳钢的4～5倍，焊接接头容易过热，因此在选择焊接工艺方法时，要求其能量比较集中。

3）在选择焊接工艺方法时，要考虑到不锈钢的类型，因为马氏体型不锈钢、铁素体型不锈钢和奥氏体型不锈钢在热物理性能和焊接性方面有较大的区别，因此在选择焊接方法和制定焊接工艺时也应该有所不同。

4）此外，在选择焊接方法时还要考虑其先进性、经济性和实用性。所谓先进性就是要求有较高的自动化和智能化程度，有较高的生产率；所谓经济性就是要进行成本核算；所谓实用性，首先要考虑是否能满足不锈钢焊接的要求，其次要考虑到产品结构、形状大小、焊缝的位置、施焊时的工况条件等。

总之，在选择焊接方法时，要根据具体情况作具体分析。

（2）不锈钢焊接方法的选择

不锈钢焊接首选的焊接方法应该是惰性气体保护焊，对于厚度小于3 mm的不锈钢，可以采用钨极氩弧焊（TIG焊），包括脉冲钨极氩弧焊，如果焊缝是规则的，可以采用自动钨极氩弧焊；对于厚度小于1 mm的不锈钢，可以采用微束等离子氩弧焊或小电流脉冲氩弧焊，也可用激光焊。

对于厚度大于3 mm的不锈钢，可以采用熔化极氩弧焊（MIG焊），厚度在6～12 mm的不锈钢，用等离子弧焊较合适。

对于厚度较大的不锈钢，可采用窄间隙焊、氩气保护药芯焊丝自动焊、真空电子束焊，采用适当的工艺措施，也可采用埋弧焊。

手工电弧焊由于工艺灵活，设备简单，在实际生产中仍被广泛采用，尤其在设备安装施工中，应用较多的是氩弧焊打底、手弧焊填缝的工艺方法。

摩擦焊和钎焊在某些情况下也常被采用。摩擦焊由于动态再结晶可以获得细晶接头，钎焊可以获得变形极小的接头。

各种焊接方法对于不同类型不锈钢的适用性如表4.5-8所示。

表4.5-8　各种焊接方法对不同类型不锈钢的适用性

焊接方法	不锈钢			厚度/mm	说明
	奥氏体	马氏体	铁素体		
手工电弧焊	适用	适用	适用	>2.0	单面焊，背面成形不理想，焊缝余高大
钨极氩弧焊	适用	较适用	适用	0.5～3.0	厚度大于3 mm时，可采用多层焊，生产效率低
脉冲钨极氩弧焊	适用	应用较少	较适用	<0.5 0.5～3.0	卷边接头 热输入低，焊接参数调节范围广



续表 4.5-8

焊接方法	不锈钢			厚度/mm	说明
	奥氏体	马氏体	铁素体		
熔化极氩弧焊	适用	较适用	较适用	3.0~8.0 >8.0	开坡口，单面焊双面成形 开坡口，多层多道焊
脉冲熔化极氩弧焊	适用	适用	较适用	>2.0	热输入低，焊接参数调节范围广
等离子弧焊	适用	较适用	较适用	<4.0 4.0~12.0	采用熔透法 采用小孔法，开I形坡口，单面焊双面成形
微束等离子弧焊	适用	较适用	较适用	<0.5	卷边接头
埋弧焊	适用	很少应用	很少应用	>6.0	效率高，劳动条件好，冷速慢
真空电子束焊	适用	很少用应	较适用	>12.0	生产率高，设备贵
激光焊	适用	很少应用	较适用	<1.0	焊接效率高
电阻焊	适用	很少应用	较少应用	<10.0	棒状、管状对接接头
摩擦焊	适用	较少应用	较适用	<10.0	棒状、管状对接接头
钎焊	适用	较适用	适用	<3.0	变形小，接头强度低

3.2　不锈钢的焊接材料

(1) 不锈钢焊接材料选择原则及方法

1) 不锈钢焊接材料选择原则　在选择不锈钢焊接填充材料时，应考虑以下的原则。

① 不锈钢焊接在选择填充材料时，和一般金属材料焊接时选择填充材料一样，首先要考虑等强度的原则，即焊缝金属的力学性能要和母材的力学性能一致。

② 由于不锈钢是具有特殊用途的高合金钢，不仅要求有一定的力学性能，而且还要求有较高的抗氧化和耐腐蚀性能。这就要求焊缝金属与母材具有同样的抗氧化和耐腐蚀性能，也就是要求焊缝金属与母材等电位化学成分接近。

③ 不锈钢焊接时，要考虑在选定的焊接工艺方法下的合金元素实际过渡系数，以及母材熔合比对焊缝金属化学成分的影响。

④ 要考虑到不锈钢焊接性的特殊要求，适当调整焊缝金属的化学成分和显微组织，例如，亚稳定型奥氏体不锈钢焊接时，为防止晶间腐蚀，要求尽可能降低焊缝金属中的含碳量，以及形成比母材稍高的少量铁素体。

总之，在选择不锈钢焊接填充材料时，要全面考虑焊缝金属的综合性能与母材相匹配，以及焊接性方面的特殊要求。

2) 不锈钢焊接材料选择方法　不锈钢焊接时填充材料的选择，关键是保证焊缝金属获得所需的化学成分，才有可能获得所需的组织和性能。

① 焊缝金属化学成分的估算　对于熔焊来说，焊缝金属是由填充材料和熔化了的母材两部分组成的，母材在焊缝金属中所占的百分比称为熔合比，焊缝金属中某一合金元素的含量可以用下式来表示：

$$C_w = bC_b + (1-b)\eta C_F \tag{4.5-1}$$

式中，C_w 为某合金元素在焊缝金属中的含量，%；C_b 为某合金元素在母材金属中的含量，%；C_F 为某合金元素在填充金属中的含量，%；b 为熔合比；η 为合金元素的过渡系数。

上述公式仅适用于焊丝作为填充金属的气体保护焊情况，如果采用电焊条手弧焊、埋弧焊或药芯焊丝焊接，还要考虑到药皮、焊剂或药芯的渗合金情况，通过不同方式渗合金，其合金元素的过渡系数是不一样的。

② 焊缝金属组织的预测　根据焊缝金属的化学成分，利用舍夫勒（Schaefflar）组织图，可以预测焊缝金属的组织，其方法有两种。

一是计算法。根据母材和填充材料的化学成分以及它们的熔合比，利用式（4.5-1）计算出焊缝金属的化学成分；根据焊缝金属的化学成分，分别计算出它们的铬当量 $[Cr]_{eq}$ 和镍当量 $[Ni]_{eq}$；根据 $[Cr]_{eq}$ 和 $[Ni]_{eq}$ 找出它们在舍夫勒图中的位置，即可初步预测出焊缝的组织。

二是作图法。其步骤如下：首先根据母材和填充材料的化学成分，分别计算出它们的 $[Cr]_{eq}$ 和 $[Ni]_{eq}$；然后，根据母材和填充材料的 $[Cr]_{eq}$ 和 $[Ni]_{eq}$ 分别确定它们在舍夫勒图上的位置（两点）；第三，将该两点连成一条直线；第四，根据母材在焊缝金属中的熔合比，在直线上确定焊缝的位置，也就求得了焊缝的组织。

为了说明问题，假设焊接低碳钢和18-8奥氏体不锈钢。首先，根据低碳钢和18-8不锈钢的化学成分，分别计算出它们的 $[Cr]_{eq}$ $[Ni]_{eq}$，并找出它们在舍夫勒图中的位置，m 点（低碳钢）和 s 点（18-8奥氏体不锈钢），如图4.5-9所示；将 m 点和 s 点连成一条直线；再假设低碳钢和不锈钢的熔化量相等，在 ms 直线上按比例确定出在不加填充材料的情况下焊缝的位置为 a 点，可以看出，此时焊缝的组织为马氏体。

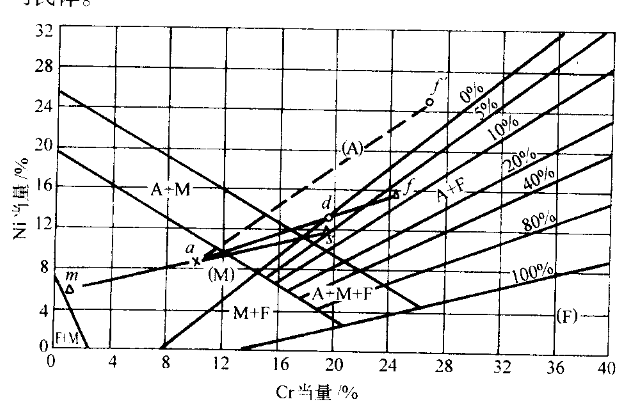


图4.5-9　利用舍夫勒图确定焊缝的组织

如果采用18-8不锈钢焊条（如E0-19-10-15）来焊接低碳钢和不锈钢异种钢接头，则还需要根据18-8钢焊条熔敷金属的化学成分，计算其 $[Cr]_{eq}$ 和 $[Ni]_{eq}$，并在舍夫勒图中找出其位置 f 点。如果低碳钢和不锈钢母材的熔化量相等，则可将 a 点与 f 点连成一条直线，再根据低碳钢和不锈钢母材的熔化量在焊缝中所占的比例，即熔合比，可确定焊缝成分在 af 线上的位置。假设熔合比为30%，则通过作图法可求得焊缝位置为 d，其中 a 点相当于熔合比为1（即焊缝无填充材料），f 点相当于熔合比为0（即纯熔敷金属）。此时焊缝组织为含有微量铁素体的奥氏体。



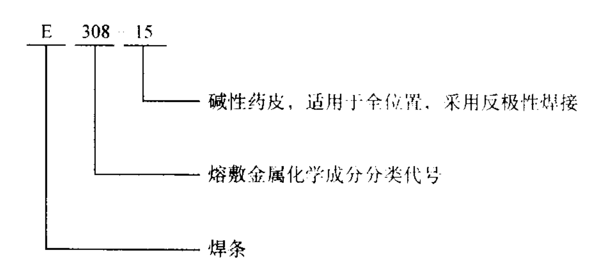
如果选用 25-20 型不锈钢焊条（如 E1-25-20-15），同样在舍夫勒图中可以找到其位置 f 点，连接 a 点和 f 点，根据熔合比就可以确定出焊缝组织在 af 上的位置。从图中可以看出，只要熔合比相对较小，就可以获得全部为奥氏体的焊缝。

（2）不锈钢焊条

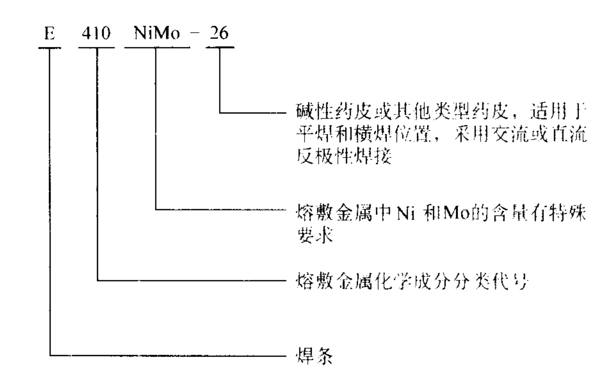
1）不锈钢焊条的型号　我国不锈钢焊条的型号按熔敷金属的化学成分、药皮类型、焊接位置、焊接电流种类及其用途，已列入国家标准 GB/T 983－1995，该标准等效采用美国 ANSI/AWSA5.4-92 不锈钢焊条标准。

不锈钢焊条型号的编制方法：字母“E”表示焊条，“E”后面的数字表示熔敷金属化学成分分类代号，如果有特殊要求的化学成分用元素符号表示，放在数字的后面。短划“-”后面的两位数字表示焊条药皮类型、焊接位置及焊接电流种类。举例说明如下。

例 1



例 2



我国不锈钢焊条型号发展较快，从 GB/T 983—1967 中不足 20 个型号的不锈钢焊条，发展到 GB/T 983—1995 的 52 个牌号，类型也更加齐全，包含有奥氏体型不锈钢用焊条、铁素体型不锈钢用焊条以及奥氏体铁素体型不锈钢用焊条；有含有稳定元素的不锈钢焊条，也有低碳和超低碳不锈钢焊条，以及专用不锈钢焊条。

按照国标 GB/T 983—1995 规定，不锈钢焊条熔敷金属铬的含量大于 10.5%，铁的含量应超过其他任何元素。根据熔敷金属的化学成分、药皮类型、焊接位置及焊接电流种类划分的不锈钢焊条型号如表 4.5-9 及表 4.5-10 所示。

表 4.5-9　不锈钢焊条熔敷金属化学成分、力学性能及主要用途（摘自 GB/T 983—1995）

焊条型号	化学成分（质量分数）/%										力学性能			主要用途
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	其他	σ_b /MPa	δ_5 /%	热处理	
E209-××	0.60	20.5～24.5	9.5～12.0	1.5～3.0	4.0～7.0	0.90	0.040	0.030	0.75	N: 0.10～0.30 V: 0.10～0.30	690	15	—	焊接相同类型不锈钢，也可用于异种钢焊接，如低碳钢和不锈钢，还可在低碳钢上堆焊防腐层
E219-××	0.60	19.0～21.5	5.5～7.0	0.75	8.0～10.0	1.00	0.040	0.030	0.75	N: 0.10～0.30	620	15	—	
E240-××	0.60	17.0～19.0	4.0～6.0	0.75	10.5～13.5	1.00	0.040	0.030	0.75		690	15	—	焊接相同类型不锈钢，也可用于异种钢焊接
E307-××	0.04～0.14	18.0～21.5	9.0～10.7	0.5～1.5	3.30～4.75	0.90	0.040	0.030	0.75		590	30	—	用于异种钢焊接
E308-××	0.08	18.0～21.0	9.0～11.0	0.75	0.5～2.5	0.90	0.040	0.030	0.75		550	35	—	用于焊接相同类型不锈钢，如 Cr18Ni9、Cr18Ni12
E308H-××	0.04～0.08	18.0～21.0	9.0～11.0	0.75	0.5～2.5	0.90	0.040	0.030	0.75		550	35	—	除含碳量限制上限外，其余同 E308。有较高的高温强度和蠕变极限
E308L-××	0.04	18.0～21.0	9.0～11.0	0.75	0.5～2.5	0.90	0.040	0.030	0.75		520	35	—	除含碳量低外，同 E308。不含 Ni，Ti 也能抗晶蚀，但高温强度较低
E308Mo-××	0.08	18.0～21.0	9.0～12.0	2.0～3.0	0.5～2.5	0.90	0.040	0.030	0.75		550	35	—	除 Mo 含量较高外，同 E308。用于焊接同类型不锈钢，也可焊接 Cr18Ni12Mo
E308MoL-××	0.04	18.0～21.0	9.0～12.0	2.0～3.0	0.5～2.5	0.90	0.040	0.030	0.75		520	35	—	除含碳量低外，同 E308Mo
E309-××	0.15	22.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.5～2.5	0.90	0.040	0.030	0.75		550	25	—	焊接同类型不锈钢，也可焊接异种钢
E309L-××	0.04	22.0～25.0	12.0～14.0	0.75	0.5～2.5	0.90	0.040	0.030	0.75		520	25	—	除含碳量较低外，同 E309。不含 Ni，Ti 也能有效抗晶蚀，但高温强度较低



续表 4.5-9

焊条型号	化学成分（质量分数）/%										力学性能			主要用途
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	其他	σ_b /MPa	δ_5 /%	热处理	
E309Nb-××	0.12	22.0~25.0	12.0~14.0	0.75	0.5~2.5	0.90	0.040	0.030	0.75	Nb:0.70~1.00	550	25	—	除含碳量稍低，并加入Nb外，同E309，Nb提高了抗晶蚀和高温强度，常用于0Cr18Ni11Nb复合钢板焊接或在碳钢上堆焊
E309Mo-××	0.12	22.0~25.0	12.0~14.0	2.0~3.0	0.5~2.5	0.90	0.040	0.030	0.75		550	25	—	除含碳量稍低并加入Mo外，同E309，常用于0Cr17Ni12Mo2型复合钢焊接或在碳钢上堆焊
E309MoL-××	0.04	22.0~25.0	12.0~14.0	2.0~3.0	0.5~2.5	0.90	0.040	0.030	0.75		540	25	—	除含碳量低外，同E309Mo，抗晶蚀能力强
E310-××	0.08~0.20	25.0~28.0	20.0~22.5	0.75	1.0~2.5	0.75	0.030	0.030	0.75		550	25	—	常用于焊接同类型不锈钢，如0Cr25Ni20
E310H-××	0.35~0.45	25.0~28.0	20.0~22.5	0.75	1.0~2.5	0.75	0.030	0.030	0.75		620	10	—	除含碳量较高外，同E310，常用于同类型耐热、耐蚀不锈钢铸件焊接及补焊，不宜在高硫环境及剧烈热冲击条件下使用，不宜在802~870℃长期停留
E301Nb-××	0.12	25.0~28.0	20.0~22.0	0.75	1.0~2.5	0.75	0.030	0.030	0.75	Nb：0.7~1.0	550	25	—	除含碳量稍低并加入Nb外，同E310，焊接耐热钢铸件0Cr18Ni11Nb型复合碳，或在碳钢上堆焊
E310Mo-××	0.12	25.0~28.0	20.0~22.0	2.0~3.0	1.0~2.5	0.75	0.030	0.030	0.75		550	25	—	除含碳量稍低并加入Mo外，同E310，焊接耐热钢铸件0Cr17Ni12Mo型复合钢，或在碳钢上堆焊
E312-××	0.15	28.0~32.0	8.0~10.5	0.75	0.5~2.5	0.90	0.04	0.030	0.75		660	22	—	用于高镍合金与其他金属的焊接，焊缝为铁素体+奥氏体双相组织，抗裂性好，但不宜在420℃以下使用
E316-××	0.08	17.0~20.0	11.0~14.0	2.0~3.0	0.5~2.5	0.90	0.04	0.030	0.75		520	30	—	用于焊接0Cr17Ni12Mo2型不锈钢及相类似的合金，抗蠕变能力强
E316H-××	0.04~0.08	17.0~20.0	11.0~14.0	2.0~3.0	0.5~2.5	0.90	0.04	0.030	0.75		520	30	—	除碳含量限制上限外，同E316，具有较高的高温强度和蠕变极限
E316L-××	0.04	17.0~20.0	11.0~14.0	2.0~3.0	0.5~2.5	0.90	0.04	0.030	0.75		490	30	—	除含碳量较低外，同E316，有较好的抗晶蚀性能，用于低碳含Mo奥氏体钢的焊接
E317-××	0.08	18.0~21.0	12.0~14.0	3.0~4.0	0.5~2.5	0.90	0.04	0.030	0.75		550	25	—	合金元素特别是Mo略高于E316，通常用于焊接同类型不锈钢，适合在强强腐条件下使用
E317L-××	0.04	18.0~21.0	12.0~14.0	3.0~4.0	0.5~2.5	0.90	0.04	0.030	0.75		520	25	—	除含碳量较低外，同E317，抗晶蚀性能好，焊缝强度不如E317
E317MoCu-××	0.08	18.0~21.0	12.0~14.0	2.0~2.5	0.5~2.5	0.90	0.035	0.03	2.0		540	25	—	含Cu量较高，具有较高的抗蚀性，用于同类不锈钢的焊接
E317MoCUL-××	0.04	18.0~21.0	12.0~14.0	3.0~4.0	0.5~2.5	0.90	0.035	0.030	2.0		540	25	—	Mo含量较高并含Cu，抗晶蚀性能好，焊缝强度不如E317
E318-××	0.08	17.0~20.0	11.0~14.0	2.0~3.0	0.5~2.5	0.90	0.040	0.030	0.75	Nb：6C~100	550	25	—	除加Nb外与E316相似，抗晶蚀能力强，用于焊接同类不锈钢

续表 4.5-9

焊条型号	化学成分（质量分数）/%										力学性能			主要用途
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	其他	σ_b /MPa	δ_5 /%	热处理	
E318V-××	0.08	17.0~20.0	11.0~14.0	2.0~2.5	0.5~2.5	0.90	0.04	0.035	0.5	V：0.30~0.70	540	25	—	除加 V 外与 E316 相似，有较高的热强与抗蚀性，用于焊接同类不锈钢
E320-××	0.07	19.0~21.0	32.0~36.0	2.0~3.0	0.5~2.5	0.60	0.040	0.030	3.0~4.0	Nb：8C~1.0	550	30	—	加入 Nb，提高了抗晶蚀能力，用于焊接各种化工设备，当不含 Nb 时，也可用于含 Nb 不锈钢的补焊，焊后需进行固溶处理
E320LR-××	0.03	19.0~21.0	32.0~36.0	2.0~3.0	1.5~2.5	0.30	0.020	0.015	3.0~4.0	Nb：8C~0.40	520	30	—	除 C、Si、S、P 含量较低处，同 E320，用于含有铁素体的奥氏体不锈钢焊接，强度比 E320 稍低
E330-××	0.18~0.25	14.0~17.0	33.0~37.0	0.75	1.0~2.5	0.90	0.040	0.030	0.75		520	25	—	焊接在 980℃以上工作的不锈钢，及同类不锈钢铸件补焊及铸造合金与锻造焊金的焊接
E330H-××	0.35~0.45	14.0~17.0	33.0~37.0	0.75	1.0~2.5	0.90	0.040	0.030	0.75		620	10	—	除含 C 较高外，同 E330，用于同类耐热、耐蚀高合金铸件的焊接与补焊
E330MoMnWNb-××	0.20	15.0~17.0	33.0~37.0	2.0~3.0	3.5	0.70	0.035	0.030	0.5	Nb：1.0~2.0 W：2.0~3.0	590	25	—	除加入 W、Nb 及较高的 Mn、Mo 外，同 E330，用于在 850~950℃工作的耐热耐蚀高合金钢的焊接与补焊
E347-××	0.08	18.0~21.0	9.0~11.0	0.75	0.5~2.5	0.90	0.040	0.030		Nb：8C~1.00	520	25	—	用铌或铌加钽作稳定剂，提高抗晶蚀能力，用于焊接以铌或钛作稳定剂的成分相近的铬镍不锈钢
E349-××	0.13	18.0~21.0	8.0~10.0	0.35~0.65	0.5~2.5	0.90	0.040	0.030		Nb：0.75~1.20 V：0.10~0.30 Ti：0.15 W：1.25~1.75	690	25		加入钼、钨、铌、提高高温强度，熔敷金属中铁素体含量较高，有利抗裂，用于焊接同类不锈钢
E383-××	0.03	26.5~29.0	30.0~33.0	3.2~4.2	0.6~2.5	0.90	0.020	0.020	0.6~1.5	—	520	30	—	因碳、硫、磷含量低，抗热裂性好。焊接成分相近或其他类型不锈钢，可在硫酸和磷酸介质中使用的不锈钢
E385-××	0.03	19.5~21.5	24.5~26.0	4.2~5.2	1.0~2.5	0.75	0.030	0.020	1.2~2.0	—	520	30	—	因碳、硅、硫、磷含量低，抗热裂性好。焊接成分相近或其他类型不锈钢，可在硫酸和含氯化物介质中使用的不锈钢。也可焊接 00Cr19Ni13Mo 型不锈钢
E410-××	0.12	11.0~13.5	0.7	0.75	1.0	0.90	0.040	0.030	0.75	—	450	20	730~760℃保温 1 h，以≤60℃/h 速度炉冷至 315℃后空冷	焊接接头属空淬型材料，需焊前预热，焊后热处理，用于焊接同类不锈钢，也用于在碳钢上堆焊耐磨、耐蚀层





续表 4.5-9

焊条型号	化学成分（质量分数）/%										力学性能			主要用途
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	其他	σ_b /MPa	δ_5 /%	热处理	
E410NiMo-××	0.06	11.0～12.5	4.0～5.0	0.40～0.70	1.0	0.90	0.040	0.030	0.75	—	760	15	595～620℃保温1 h后空冷	与E410相比，镍含量较高，以限制铁素体，焊缝后热处理温度不应超过620℃，否则会使回火马氏体重新淬硬
E430-××	0.10	15.0～18.0	0.6	0.75	1.0	0.90	0.040	0.030	0.75	—	450	20	760～790℃保温2 h，以≤55℃/h速度炉冷至595℃后空冷	含铬量较高，有优良耐蚀性，热处理后有足够塑性，焊后需热处理，才能保证综合力学性能和抗蚀性能
E502-××	0.10	4.0～6.0	0.4	0.45～0.65	1.0	0.90	0.040	0.030	0.75	—	420	20	840～870℃保温2 h，以≤55℃/h速度炉冷至595℃后空冷	用于焊接相同类型的不锈钢管材，焊接接头属空淬硬材料，焊接时需进行预热和焊后热处理
E505-××	0.10	8.0～10.5	0.4	0.85～1.20	1.0	0.90	0.040	0.030	0.75	—	420	20		
E630-××	0.05	16.0～16.75	4.5～5.0	0.75	0.25～0.75	0.75	0.040	0.030	3.25～4.00	Nb：0.15～0.30	930	7	1 025～1 050℃保温1 h后空冷至室温，再加热至610～630℃进行沉淀强化处理，后空冷	焊接Cr16Ni4型沉淀硬化不锈钢熔敷金属化学成分限制了马氏体组织中网状铁素体的存在，根据使用要求，焊缝可在焊后经沉淀硬化处理或固溶处理，也可在焊态使用
E16-8-2-××	0.10	14.5～16.5	7.5～9.5	1.0～2.0	0.5～2.5	0.60	0.030	0.030	0.75	—	550	35	—	焊接高温、高压不锈钢管，抗裂性良好，耐蚀性较差
E16-25MoV-××	0.12	14.0～18.0	22.0～27.0	5.0～7.0	0.5～2.5	0.90	0.035	0.030	0.50	N≥0.1	—	—	—	焊发淬火状态下的低、中合金钢及刚度较大的耐热钢
E7Cr-××	0.10	6.0～8.0	0.40	0.45～0.65	1.0	0.90	0.040	0.030	0.75	—	420	20	同E502	焊接同类管材及铸件，接头属空淬型材料，焊接时需焊前预热，焊后热处理
E5MoV-××	0.12	4.5～6.0	—	0.40～0.70	0.5～0.9	0.50	0.035	0.030	0.5	V：0.10～0.35	540	14	740～760℃保温4 h后空冷	焊接Cr50Mo耐热钢，焊缝有较好的抗高温氢蚀能力，焊接时需预热和焊后热处理



续表 4.5-9

焊条型号	化学成分（质量分数）/%										力学性能			主要用途
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	其他	σ_b /MPa	δ_5 /%	热处理	
E9Mo-××	0.15	8.5～10.0	—	0.70～1.00	0.5～1.0	0.50	0.035	0.030	0.5	—	590	16	730～750℃保温4 h后空冷	焊接同类管材或铸件，焊接接头属空淬型材料，焊接时需预热和焊后热处理
E11MoVNi-××	0.19	9.5～11.5	0.60～0.90	0.60～0.90	0.5～1.0	0.50	0.035	0.030	0.5	0.20～0.040	730	15	730～750℃保温1 h后空冷	焊接在565℃以下工作的Cr11MoV型耐热钢结构件，焊接时需预热和焊后热处理
E11MoV-NiW-××	0.19	9.5～12.0	0.40～1.10	0.80～1.00	0.5～1.0	0.50	0.035	0.030	0.5	V：0.20～0.40 W:0.040～0.70	730	15	730～750℃保温1 h后空冷	焊接工作温度在580℃以下的Cr11MoVW型热强钢，焊缝有良好的耐热性，焊接时需预热和焊后热处理
E2209-××	0.04	21.5～23.5	8.5～10.5	2.5～3.5	0.5～2.0	0.90	0.040	0.030	0.75	N：0.08～0.20	690	20	—	焊接铬约为22%的双相不锈钢，焊缝为奥氏体铁素体双相组织，有较高的抗点蚀和应力腐蚀能力
E2553-××	0.06	24.0～27.0	6.5～8.5	2.9～3.9	0.5～1.5	1.0	0.040	0.030	1.5～2.5	N：0.10～0.25	760	15	—	焊接铬为25%左右的双相不锈钢，焊缝为奥氏体铁素体双相组织，强度高，抗点蚀和应力腐蚀能力较高

注：1. 表中单值均为最大值；
2. 当对表中给出的元素进行化学分析并还存在其它元素时，这些元素的总的质量分数不得超过 0.5%（铁除外）；
3. 焊条型号中的字母 L 表示含碳量较低，H 表示含碳量较高，R 表示碳、磷、硅含量较低；
4. E520、E505、E7Cr、E5MoV、E9Mo 等型号焊条实际上不属于不锈钢焊条；
5. 当后缀-××表示-15、-16、-17、-25、-26。

表 4.5-10　焊条药皮类型、焊接位置和焊接电流种类

焊条型号	药皮类型	焊接位置	焊接电流种类
E×××(×)-15	碱性	全位置	直流反接
E×××(×)-25		平焊、横焊	
E×××(×)-16	可以是碱性，也可以是钛型或钛钙型	全位置	交流或直流反接
E×××(×)-17			
E×××(×)-26		平焊、横焊	

2）不锈钢焊条的牌号　焊条牌号是生产厂家对其产品名称标识的特定编号，我国不锈钢焊条牌号是各生产厂家根据不锈钢焊条型号的编制方法，即按照焊条熔敷金属的化学成分、力学性能、药皮类型、焊接位置及焊接电流种类，实行统一的牌号，其表示方法如下。

① 焊条牌号前边的第一个字母为汉语拼音字母，G 表示高铬不锈钢焊条，A 表示奥氏体不锈钢焊条。

② G 或 A 后面的第一位数字表示焊条熔敷金属的主要化学成分，其等级按表 4.5-11 编排。

表 4.5-11　不锈钢焊条牌号、熔敷金属化学成分等级

焊条类型	焊条牌号	熔敷金属化学成分（质量分数）/%
高铬不锈钢焊条	G2××	W（Cr）≈13
	G3××	W（Cr）≈17
奥氏体不锈钢焊条	A0××	W（C）≤0.04
	A1××	W（Cr）≈19；W（Ni）≈10
	A2××	W（Cr）≈18；W（Ni）≈12
	A3××	W（Cr）≈23；W（Ni）≈13
	A4××	W（Cr）≈26；W（Ni）≈21
	A5××	W（Cr）≈16；W（Ni）≈25
	A6××	W（Cr）≈16；W（Ni）≈35
	A7××	铬锰氮不锈钢
	A8××	W（Cr）≈18；W（Ni）≈18

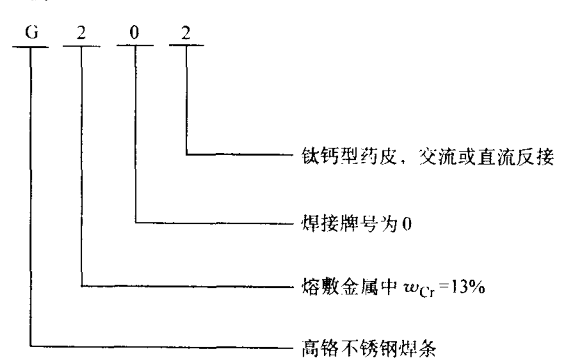


③ 第二位数字表示同一焊缝主要化学成分组成等级的不同牌号，按0、1、2、3……8、9顺序排列。

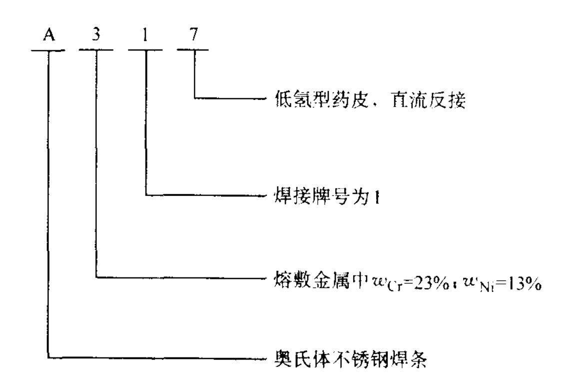
④ 第三位数字表示药皮类型和焊接电源种类。不锈钢焊条牌号只用2和7两个数字，2表示钛钙型焊条，交直流两用，交流或直流反接电源焊接；7表示低氢型焊条，又称碱性焊条，只限于直流反接电源焊接。

举例如下：

例1



例2



不锈钢焊接牌号与国标GB/T 983—1995焊条型号的对应关系，以及熔敷金属主要化学成分和主要用途如表4.5-12所示。

表4.5-12　不锈钢焊条牌号及主要用途

牌号	型　号	熔敷金属主要化学成分（质量分数）/%	主要用途
G202	E410-16	C≤0.12 Cr = 11.0 ~ 03.5	焊接0Cr13、1Cr13不锈钢，也可用于耐蚀、耐磨表面堆焊
G207	E410-15		
G217			焊接0Cr13、1Cr13、2Cr13不锈钢，也可用于耐蚀、耐磨表面堆焊
G302	E430-16	C≤0.10 Cr = 15.0 ~ 18.0	焊接耐蚀（硝酸）、耐热的Cr17不锈钢
G307	E430-15		
A001G15	E308L-15	C≤0.04 Cr = 18.0 ~ 21.0 Ni = 9.0 ~ 11.0	适于平焊、平角焊同类不锈钢
A002	E308L-16		焊接超低碳Cr19Ni10型不锈钢，也可用于0Cr19Ni11Ti工作温度低于300℃的耐蚀不锈钢，主要用于合成纤维、化肥、石油设备
A002A	E308L-17		适于焊接含Ti奥氏体不锈钢及同类不锈钢，直径不大于3.2 mm焊条可全位置焊，其他直径焊条仅适用于平焊
A012Si		C≤0.04，Si = 3.5 ~ 4.5 Cr = 18.0 ~ 22.0 Ni = 12.0 ~ 15.0	焊接抗浓硝酸腐蚀的超低碳不锈钢（00Cr17Ni15Si4Nb）
A002Nb		C≤0.04，Nb = 8C ~ 1.0 Cr = 18.0 ~ 21.0，Ni = 9.0 ~ 11.0	焊接重要的超低碳含钛的Cr19Ni11Ti型耐蚀不锈钢
A002Mo	E305MoL-16	C≤0.04，Mo = 2.0 ~ 3.0 Cr = 18.0 ~ 21.0，Ni = 9.0 ~ 12.0	焊接超低碳不锈钢，也可用于0Cr18Ni9Ti与碳钢的焊接，如合成纤维、石油、化肥设备
A022	E316L-16	C≤0.04，Mo = 2.0 ~ 3.0 Cr = 17.0 ~ 20.0，Ni = 11.0 ~ 14.0	焊接尿素、合成纤维设备及同类不锈钢，也可用于焊后不热处理的高铬不锈钢以及复合钢和异种钢的焊接
A022Si	E316L-16	C≤0.04，Mo = 2.5 ~ 3.0 Cr = 18.5 ~ 20.5，Ni = 10.5 ~ 12.0	焊接冶炼设备中的衬里及管材



续表 4.5-12

牌号	型　号	熔敷金属主要化学成分（质量分数）/%	主 要 用 途
A022L	A316L-16	C≤0.03，Mo = 2.0 ~ 3.0 Cr = 17.0 ~ 20.0，Ni = 11.0 ~ 14.0	焊接核安全一级铬镍奥氏体不锈钢管和容器，以及尿素、合成纤维等设备和焊后不热处理的高铬不锈钢及异种钢的焊接
A032	E317MoCuL-16	C≤0.04，Mo = 2.0 ~ 3.0 Cr = 18.0 ~ 21.0，Ni = 12.0 ~ 14.0 Cu≤2.0	因含钼、铜，在硫酸中有较高抗蚀性，用于焊接合成纤维等设备，以及在稀、中浓度硫酸介质中工作的同类超低碳不锈钢，也可焊接0Cr10Si3耐酸钢
A042	E309MoL-16	C≤0.04，Mo = 2.0 ~ 3.0 Cr = 22.0 ~ 25.0，Ni = 12.0 ~ 14.0	用于同类超低碳不锈钢（如尿素合成塔衬里）及异种钢的焊接
A042Si		C≤0.04，Mo = 2.7 Cr = 22.5，Ni = 13.5	用于同类超低碳不锈钢（如尿素合成塔衬里）及异种钢的焊接
A042Mn		C≤0.04，Mo = 1.9 ~ 2.4 Cr = 24.0 ~ 26.0，Ni = 19.0 ~ 23.0 Mn = 3.0 ~ 5.5	用于尿素合成塔系统设备如Cr25Ni22Mo2型不锈钢的焊接
A052		C≤0.04，Mo = 4.0 ~ 5.0 Cr = 17.0 ~ 22.0，Ni = 22.0 ~ 27.0 Cu≤2.0	用于耐硫酸、醋酸、磷酸腐蚀的反应器、分离器不锈钢的焊接，也可用于耐海水腐蚀用钢（00Cr18Ni24Mo5）以及异种钢的焊接
A062	E309L-16	C≤0.04，Mo≤0.75 Cr = 22.0 ~ 25.0，Ni = 12.0 ~ 14.0	用于合成纤维、石油化工等设备同类不锈钢以及复合钢和异种钢的焊接，也可用于核反应堆压力容器内壁过渡层堆焊和塔内构件的焊接
A072		C≤0.04 Cr = 27.0 ~ 29.0，Ni = 14.0 ~ 16.0	用于00Cr25Ni20Nb钢的焊接，如核燃料设备等
A082		C≤0.035，Si = 3.5 ~ 4.5 Cr = 17.0 ~ 21.0，Ni = 13.0 ~ 15.0	用于00Cr17Ni15Si4Nb、00Cr14Ni14Si4等耐浓硝酸腐蚀钢的焊接和补焊
A101 A102	E308-16	C≤0.08 Cr = 18.0 ~ 21.0 Ni = 9.0 ~ 11.0	用于焊接工作温度低于300℃的耐蚀的0Cr19Ni9、0Cr19Ni11Ti不锈钢
A102A A102T	E308-17 E308-16		用于焊接工作温度低于300℃的耐蚀0Cr19Ni9、0Cr19Ni11Ti不锈钢及堆焊不锈钢表面层
A107	E308-15		用于焊接工作温度低于300℃的0Cr19Ni9型不锈钢，也可焊接一些焊接性较差的钢材（如高铬钢）以及堆焊不锈钢表面层
A112 A117		C≤0.12，Mn≤2.5 Cr = 17.0 ~ 22.0，Ni = 7.0 ~ 11.0	用于一般对耐蚀性要求不高的0Cr19Ni9型不锈钢的焊接
A122		C≤0.08，Mn≤2.5 Cr = 20.0 ~ 24.0，Ni = 7.0 ~ 10.0	用于焊接工作温度低于300℃，要求抗裂及耐蚀性较高的0Cr19Ni9型不锈钢
A132 A132A A137	E347-16 E347-17 E347-15	C≤0.08，Nb = 8C ~ 1.0 Cr = 18.0 ~ 21.0 Ni = 9.0 ~ 11.0	用于焊接重要的耐蚀含钛的0Cr19Ni11Ti型不锈钢
A146		C≤0.12，Mn = 4.0 ~ 7.0 Cr = 19.0 ~ 22.0，Ni = 8.0 ~ 11.0	用于焊接重要的0Cr20Ni10Mn6型不锈钢
A172	E307-16	C = 0.04 ~ 0.14，Mn = 3.30 ~ 4.75 Cr = 18.0 ~ 21.5，Ni = 9.0 ~ 10.7	适用于ASTM307钢及异种钢焊接，也可用于耐冲击腐蚀和过渡层的堆焊，如高锰钢、淬硬钢等
A201	E316-16	C≤0.08，Mo = 2.0 ~ 3.0 Cr = 17.0 ~ 20.0，Ni = 11.0 ~ 14.0	用于焊接在有机酸和无机酸（非氧化酸）介质中工作的0Cr18Ni12Mo2不锈钢，也可用于焊后不热处理的高铬钢或异种钢
A202			用于焊接在有机酸和无机酸（非氧化酸）介质中工作的0Cr18Ni12Mo不锈钢或异种钢
A202NE		C≤0.06，Mo = 2.0 ~ 3.0 Cr = 17.0 ~ 20.0，Ni = 11.0 ~ 14.0	用于焊接核安全二级铬镍奥氏体钢管和容器，也用于焊接有机酸和无机酸（非氧化酸）介质中工作的0Cr18Ni12Mo2不锈钢或异种钢



续表 4.5-12

牌号	型　号	熔敷金属主要化学成分（质量分数）/%	主 要 用 途
A207	E316-15	C≤0.08，Mo＝2.0～3.0 Cr＝17.0～20.0，Ni＝11.0～14.0	用于焊接低碳0Cr18Ni12Mo2，也可用于焊接焊后不热处理的高铬钢及异种钢
A212	E318-16	C≤0.08，Mo＝2.0～3.0 Cr＝17.0～20.0，Ni＝11.0～14.0 Nb＝6C～1.0	用于焊接重要的0Cr18Ni12Mo2、00Cr17Ni14Mo2等不锈钢，如尿素合成塔、维尼纶接触腐蚀介质的设备
A222	E317MoCu-16	C≤0.08，Mo＝2.0～2.5 Cr＝18.0～21.0，Ni＝12.0～14.0 Cu≤2.0	用于焊接同类含铜不锈钢
A232	E318V-16	C≤0.08，Mo＝2.0～2.5 Cr＝17.0～20.0，Ni＝11.0～14.0 V＝0.3～0.7	焊接耐热耐蚀的Cr19Ni10及0Cr18Ni12Mo2不锈钢
A237	E318V-15		用于耐热耐蚀的Cr19Ni10及0Cr18Ni12Mo2不锈钢的多层焊
A242	E317-16	C≤0.08，Mo＝3.0～4.0 Cr＝18.0～21.0，Ni＝12.0～14.0	用于焊接同类不锈钢以及复合钢、异种钢
A301	E309-16	C≤0.15 Cr＝22.0～25.0，Ni＝12.0～14.0	焊接同类不锈钢、衬里、异种钢（1Cr19Ni9与低碳钢）以及高铬钢、高锰钢等
A302			
A307	E309-15		
A312	E309Mo-16	C≤0.12，Mo＝2.0～3.0 Cr＝22.0～25.0，Ni＝12.0～14.0	焊接耐硫酸介质（硫氢）腐蚀的同类不锈钢，也可用于不锈钢衬里、复合钢、异种钢焊接
A312SL			用于焊接表面渗铝的Q235、20 g和Cr5Mo等钢材，也可焊接异种钢
A317	E309Mo-15		用于焊接耐硫酸介质（硫氢）腐蚀的同类不锈钢、复合钢、异种钢
A402	E310-16	C＝0.08～0.20 Cr＝25.0～28.0，Ni＝20.0～22.5	用于同类耐热不锈钢、衬里及异种钢焊接，也可焊硬化性大的Cr5Mo、Cr9Mo、Cr13及Cr28
A407	E310-15		
A412	E310Mo-16	C≤0.12，Mo＝2.0～3.0 Cr＝25.0～28.0，Ni＝20.0～22.0	用于焊接在高温下工作的耐热不锈钢，也可焊接不锈钢衬里、异种钢及淬硬性高的碳钢、低合金钢等
A422		C≤0.20，Mn＝5.0～10.0 Cr＝23.0～27.0，Ni＝16.0～20.0	用于焊接Cr25Ni20Si2，如炉卷轧机的焊接和补焊，以及异种钢的焊接
A427			
A432	E310H-16	C＝0.35～0.45 Cr＝25.0～28.0，Ni＝20.0～22.5	专用于焊接HK-40耐热钢
A462		C≤0.15～0.30 Cr＝25.0～28.0，Ni＝30～35	用于焊接高温炉管（HK-40，HP-40，RC-1，RS-1，1N-80等）
A502	E16-25MoN-16	C≤0.12，Mo＝5.0～7.0 Cr＝14.0～18.0，Ni＝22.0～27.0 N≥0.1	用于焊接淬火状态下的低、中合金钢，异种钢及刚度较大的结构以及相应的热强钢，如淬火态下的30CrMnSi及不锈钢、碳钢、铬钢等
A507	E16-25MoN-15		
A512	E16-8-2-16	C≤0.10，Mo＝1.0～2.0 Cr＝14.5～16.5，Ni＝7.5～9.5	主要用于高温、高压不锈钢管路的焊接
A607	E33MoMnWNb-15	C≤0.20，Mo＝2.0～3.0 Cr＝15.0～17.0，Ni＝33.0～37.0 W＝2.0～3.0，Nb＝1.0～2.0	用于焊接在850～900℃工作的同类不锈钢以制氢转化炉中集合管和膨胀管（如Cr25Ni32和Cr18Ni37）
A707		C≤0.15，Mo＝1.0～2.0 Cr＝14.0～16.0，Ni＝11.0～14.0 N＝0.17～0.30	用于醋酸、维尼纶、尿素等生产设备的Cr17Mn13MoN（与Q235钢）的焊接
A717		C＝0.15～0.25，Mn＝14.0～16.0 Cr＝14.0～16.0，Ni＝1.5～3.0 N＝0.1～0.3	用于2Cr15Mn15Ni2N不锈钢电物理装置结构件或1Cr18Ni11Ti异种钢的焊接
A802		C≤0.10，Mo＝3.0～5.0 Cr＝18.0～21.0，Ni＝17.0～19.0 Cu＝1.5～2.5	用于焊接硫酸浓度50%和承受一定工作温度和大气压力的制造合成橡胶的管道以及Cr18Ni18Mo2Cu2Ti等钢种
A902	E320-16	C≤0.07，Mo＝2.0～3.0 Cr＝19.0～21.0，Ni＝32.0～36.0 Cu＝3.0～4.0，Nb＝8C～1.0	用于在硫酸、硝酸、磷酸和氧化性酸腐蚀介质中工作的Carpenter20cb镍基合金的焊接

不锈钢焊条在国标GB/T 983—1995与GB/T 983—1985的型号表示方法有很大的区别，新旧型号对照以及部分国外型号对照列于表4.5-13。



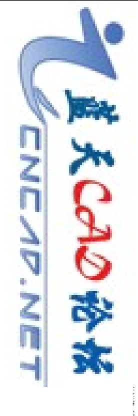
表 4.5-13 国内外不锈钢焊条对照表

中国			国际标准	美国	日本	德国	法国	英国	前苏联	瑞典	奥地利	荷兰	瑞士	韩国	比利时
GB/T983—1995	GB/T 983—1985	牌号	ISO	AWS	JIS	DIN	NF	BS	ГОСТ	ESAB	BÖHLER	NEN－ISO	UTP	HYUNDAI	ARCOS
E209															
E219															
E240															
E307	E1－19－9MoMn4	A172		E307		E188MnR28									
E308	E0－19－9	A101;A102; A107; A102A; A102T	E199R17036X	E308	D308	E199R26 E199MPR 36178 E199B20		E19.9B E19.9R E19.9RMP	304Cr20Ni19 307X20H9	OK61.53 OK61.35	FOXAS2－A FOXAS2		6820 68Kb	S－308.16h	InoxendALC
E308H				E308											
E308L	E00－19－10	A002 A002A A001G15	E199LR16 E199LR23 E199LR15036	E308L E308ELC	D308L	E199LR23 E199LB16 E199LR23150	EZ19.9R11023 EZ19.9LR23 EZ19.9R15023 EZ19.9R16	E19.9LR E19.9LB	302Cr21Ni10Mn2 304X20H9	OK61.30 OK61.34 OK61.41 OK61.52	FOXA8－L FOXEAS2－A	E199LR23 E199LR15036 E199LR16	68LC 68LCHL 684LC 6820LC	S－308L.16N	Chromend ALC Inoxend ALC
E308Mo	E0－19－10Mo2			E308Mo		E20103MPR12－3175				OK63.32					
E308MoL	E00－19－10Mo2	A002Mo													
E309	E1－23－13	A301 A302 A307	E2312R26	E309	D309	E2312MPR－36170		E23.12R	310Cr25NiBMo2	OK67.62	FOXFF－A		6824	S－309.16N	Chromend J
E309L	E00－23－13	A062 A067	E2312R23	E309L	D309L	E2312LR23 E2312LB20	EZ23.12LR23	E23.12AR		OK67.60 OK67.75	FOXCN 23/12－A	E2312R23	6824LC	S－309L.16N	
E309Nb	E1－23－13Nb														
E309Mo	E1－23－13Mo2	A312 A317 A312SL	E23122LR23	E309Mo	D309Mo	E3133MPR36140 E22123LR23 E22123LR26150	EZ23.12.3LR23	E23.12.2LR		OK67.70 OK67.71 OK67.72		E23122LR23		S－309Mo－16	Chromend G Inoxend G
E309MoL	E00－23－13Mo2	A042 A047		E309MoL	D309MoL										
E310	E2－26－21	A402 A407	E2520B26	E310	D310	E2520R26 E2520B20	EZ25.20B20	E25.20R E25.20B		OK67.13 OK67.15 OK67.26	FOXFFB－A FOXFFB	E2520B			chromend H
E310H	E3－26－21	A432													



续表 4.5-13

中国			国际标准	美国	日本	德国	法国	英国	前苏联	瑞典	奥地利	荷兰	瑞士	韩国	比利时
GB/T983-1995	GB/T 983-1985	牌号	ISO	AWS	JIS	DIN	NF	BS	ГОСТ	ESAB	BÖHLER	NEN-ISO	UTP	HYUNDAI	ARCOS
E310Nb	E1-26-21Nb								309Cr20Ni14 Mn2Mo2						
E310Mo	E1-26- 21Mo2	A412 A417		E310Mo	D310Mo					OK67.33					
E312	E1-30-9			E312	D312	E299R23				OK68.82 OK68.81					
E316	E0-18- 12Mo2	A201 A207 A202 A200NE	E19123R 17086X	E316	D316	E19123R26 E19123B20 E19123MPR 17036		E19.12 3R E19.12.3B E19.12.3RMP	309Cr20Ni 14Mn2Mo2	OK63.53 OK62.52 OK63.32	FOXAS4 - A FOXAS4		6820Mo 68Mokb	S-316.16N	chromend B Inoxend B Stainlend B
E316H															
E316L	E00-18- 12Mo2	A022 A022L A022Si	E19133LR23 E19123LR16 E19123LR 15036	E316L	D316L	E19123LR 23150 E19123LR23 E19123LR16 E19123LR13 E19123LB20	EZ19.12.3R23 EZ19.12.3R 15025 EC19.12.3R16	E19.12.3LR E19.12.3LAR	302Cr26Ni14 Mo2Mo2	OK63.20 OK63.30 OK63.34 OK63.35 OK63.41	FOXA16L FOXEAS4M -A	E19123LR23 E19123LR 15036 E19123LR26	68MoLC 68MoLCHL 684MoLC	S - 316L.16N	chromend BLC Inoxend BLC
E317	E0-19- 13Mo3	A242	E19134R26	E317	D317	E18134LR23		E19.13.4BR		OK63.80 OK63.85 OK63.91					chromoned DB Inoxend D Stainlend BB
E317L	E00-19- 13Mo3			E317L	D317L	E18134LR23				OK64.30					
E317MoCu	E0-19- 13Mo2Cr2	A222		E317CuL											
E317MoCuLE	E00-19- 13Mo2Cu2	A032			D316J1L										
E318	E0-18- 12Mo2Nb	A212		E318	D318			19.12.3Nb R 19.12.3Nb B		OK62.83					
E318V	E0-18- 12Mo2V	A232 A237													
E320	E0-20- 34Mo3Cu4Nb	A902													
E320LR															
E330	E2-16-35			E330											



11

续表 4.5-13

中国			国际标准	美国	日本	德国	法国	英国	前苏联	瑞典	奥地利	荷兰	瑞士	韩国	比利时
GB/T983－1995	GB/T 983－1985	牌号	ISO	AWS	JIS	DIN	NF	BS	ГOCT	ESAB	BÖHLER	NEN－ISO	UTP	HYUNDAI	ARCOS
E330H	E3－16－35														
E330 MoMnWNb	E2－16－35MoMn4W3Nb	A607							327Cr15Ni35W 3Mn2Nb2Ti						
E347	E0－19－10Nb	A132 A137 A132A	E199NbLR E199NbR26	E347	D347	E199NbR23 E199NbB20	EZ19.9NbLR 23	19.9.Nb R 19.9.Nb B 19.9.NbLAR	308Cr20Ni9Mn 2Nb 308Cr14Ni10 Mn2MoNb	OK61.80 OK61.85	FOXFFB400 FOXSAS2－A FOXSAS2 －A/150 FOXSAS2	E199NbLR	68 6820Nb 68NbKb	S－347.16	chromend C
E349	E1－19－9MoW2Nb			E349	D349										
E383															
E385						E20255LCuR									
E410	E1－13	G302 G207 G217		E410	D410	E3MPB20 E3B20		13.B	312Cr13	OK68.15 OK68.25 OK68.42	FOXKWO		66		Stainlend 14
E410NiMo	E0－13－5Mo			E410NiMo		E134MPR 23120				OK68.17					
E430	E0－17	G302 G307		E430	D430	E17B20									
E502	E0－5Mo														
E503	E0－9Mo														
E630	E0－16－5 MoCuNb			E630	D630										
E16－8－2	E1－16－8Mo2	A512 A502		E16－8－2	D16－8－2				311Cr15Ni25-Mo6Mn2N						
E16－25MoN	E1－16－25Mo6N	A507 A507W													
E7Cr	E0－7Mo														
E5MoV	E1－5MoV														
E9Mo	E1－9Mo														
E11MoVNi	E1－11MoVNi														
E11MoVNiW	E2－11MoVNiW														
E2209				E2209											
E2553				E2553											



（3）不锈钢焊丝

1）不锈钢实芯焊丝　包括：埋弧焊用不锈钢焊丝和气体保护焊用不锈钢焊丝。气体保护焊又分熔化极气体保护焊和非熔化极气体保护焊。根据所用的气体不同，又有惰性气体保护焊、混合气体保护焊和非惰性气体保护焊。例如：钨极氩弧焊（TIG 焊）、熔化极氩弧焊（MIG 焊）、熔化极混合气体（氩、氦＋少量氧和 CO_2）保护焊（MAG 焊）以及 CO_2 气体保护焊等。

埋弧焊不锈钢焊丝的选用通常要考虑到焊丝和焊剂的配合问题以及焊剂的类型和渗合金方式问题，焊丝多为盘状供给，焊丝直径较粗，多在 ϕ3～8 mm 范围内。

熔化极气体保护焊不锈钢焊丝的选用要考虑到保护气体的性质、合金元素的烧损等问题，焊丝也多为盘状供给，焊丝直径较细，多为 ϕ0.8～2.4 mm 之间。非熔化极气体保护不锈钢填充焊丝，多为棒料供给，长度为 1 000 mm。

我国不锈钢焊丝根据 GB 4241—84 规定，其类别、牌号及化学成分如表 4.5-14 所示。牌号中的第一个字母“H”为“焊”字的汉语拼音，表示焊丝。

国产不锈钢焊丝与国外部分国家不锈钢焊丝对照如表 4.5-15 所示。

2）不锈钢药芯焊丝　药芯焊丝自 20 世纪 50 年代问世以来，经过不断完善，至 80 年代已广泛应用于生产。由于药芯焊丝的熔敷速度高、焊缝合金成分调整方便、工艺性能好、可全位置焊接、可实现连续自动化焊接生产等一系列优点，其品种、产量逐年增加。

表 4.5-14　不锈钢焊丝牌号及其化学成分（摘自 GB/T 4242—1984）

类别	牌　号	化学成分（质量分数）/%								
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	其他
奥氏体型	H0Cr21Ni10	0.06	≤0.60	1.00～2.50	≤0.030	≤0.020	9.00～11.00	19.50～22.00	—	—
	H00Cr21Ni10	≤0.03								
	H1Cr24Ni13	≤0.12					12.00～14.00	23.00～25.00		
	H1Cr24Ni13Mo2								2.0～3.0	
	H1Cr26Ni21	≤0.15	0.20～0.59				20.00～22.50	25.00～28.00	—	
	H0Cr26Ni21	≤0.08	≤0.06							
	H0Cr19Ni12Mo2						11.00～14.00	18.00～20.00	2.0～3.0	
	H00Cr19Ni12Mo2	≤0.03								
	H00Cr19Ni12Mo2Cu2									Cu＝1.0～2.5
	H0Cr20Ni14Mo3	≤0.06					13.00～15.00	18.50～20.50	3.0～4.0	—
	H0Cr20Ni10Ti						9.00～10.50		—	Ti＝9C～1.00
	H0Cr20Ni10Nb	≤0.08					9.00～11.00	19.00～21.50		Nb＝10C～1.00
	H1Cr21Ni10Mn6	≤0.10	0.20～0.60	5.00～7.00				20.00～22.00		—
铁素体型	H0Cr14	≤0.06	0.30～0.70	0.30～0.70			≤0.06	13.00～15.00	—	—
	H1Cr17	≤0.10	≤0.50	≤0.60			—	15.50～17.00		
马氏体型	H1Cr13	≤0.12					—	11.50～13.50		—
	H1Cr5Mo		0.15～0.35	0.40～0.70			≤0.03	4.00～6.00	0.4～0.6	

表 4.5-15　国内外不锈钢焊丝对照表

中国	美国	日本	德国	英国	前苏联	瑞典	奥地利	荷兰	瑞士
GB/T 4242—1984	AWS	JIS	DIN	BS	ГОСТ	ESAB	BÖHLER	FILARC	UTP
H0Cr21Ni10	ER308	Y308	SGX5CrNi199	308S96	CB－04X19H9		AS2－1G	PZ6062 PZ6562	
H00Cr21Ni10	ER308L	Y308L	SGX2CrNi199	308S92	CB－01X19H9	OKAutrod16.12 OKAutrod16.10 OKTigrod 16.10	EAS2－1G	PZ6061 PZ6561	UTPA6820LC UTPA68LC
H1Cr24Ni13	ER309	Y309	SGX12CrNi2212	309S94	CB－07X25H13	OKAutrod16.52 OKAutrod16.53	FF－1G	PZ6079 PZ6579	UTPA6824
H1Cr24Ni13Mo2									
H1Cr26Ni21	ER310	Y310	SGX12CrNi2520	310S94			FFB－1G	PZ6076 PZ6576	UTPA68H
H0Cr26Ni21									
H0Cr19Ni12Mo2	ER316	Y316	SGXCrNiMo1911	316S96				PZ6074	
H00Cr19Ni12Mo2	ER316L	Y316L	SGX2CrNiMo1912	316S92		OKAntrod16.30 OKAutrad16.32 OKTigrod16.30	EAS4M－1G	PZ6065 PZ6505	VTPA6820MoLC VTPA68MoLC



续表 4.5-15

中国	美国	日本	德国	英国	前苏联	瑞典	奥地利	荷兰	瑞士
H00Cr19Ni12Mo2Cu2									
H0Cr20Ni14Mo3	ER317	Y317							
H0Cr20Ni10Ti	ER321	Y321			CB－06X19H9T				
H0Cr20Ni10Nb	ER347	Y347	SGX5CrNiNb199	347S96	CB－07X19H106	OKAutrod16.11 OKTigrad16.11	SAS2－IG SAS2－IGR	PZ6072 PZ6572	UTPA6820Nb UTPA68
H1Cr21Ni10Mn6					CB－08X21H10Y6				
H0Cr14									
H1Cr17	ER430	Y430	SGX8CrTi18				SKWA－IG		UTPA660
H1Cr13	ER410	Y410	SGX8Cr14				KW10－IG	PZ6078 PZ6578	UTPA66

药芯焊丝可分为自保护药芯焊丝和气保护或渣保护药芯焊丝；根据药芯成分又可分为药粉型（有造渣剂）药芯焊丝和金属粉型（无造渣剂）药芯焊丝。药粉型药芯焊丝的造渣剂按渣的碱度又分为钛型（酸性渣）、钙钛型（中性或弱碱性渣）和钙型（碱性渣）焊丝。

我国目前生产的不锈钢药芯焊丝主要是用于气体保护焊和埋弧焊的焊丝，其牌号、熔敷金属化学成分、力学性能及用途列于表 4.5-16。不锈钢药芯焊丝牌号的第一个字母 Y 为“药”的汉语拼音，表示药芯焊丝，后面的字母与数字与不锈钢焊条牌号相同。

表 4.5-16　不锈钢药芯焊丝牌号、化学成分及力学性能

牌号	直径/mm	特征和用途	熔敷金属								
			化学成分（质量分数）/%						力学性能		
			C	Si	Mn	Ni	Cr	其他	σ_b/MPa	δ_5/%	备注
YG207－2	1.6 2.0	低氢型渣系，自保护，用于焊接 0Cr13、1Cr13 不锈钢，也可用于耐蚀、耐磨表面堆焊	≤0.12	≤0.90	≤1.0	≤0.60	11.0～13.5		≥450	≥20	经 860℃×2 h 缓冷至 600℃，后空冷
YG317－1	1.6 2.0	低氢型渣系，CO_2 气体保护，用于焊接同类不锈钢，也可用于耐蚀、耐磨表面堆焊	≤0.08	≤0.09	≤1.5	5.0～6.5	15.5～17.5	Mo＝0.3～1.5	≥785	≥15	经 580℃×4 h 退火处理
YA002－2	1.2 1.6 2.0 2.4	自保护型超低碳不锈钢焊丝，用于焊接超低碳 Cr19Ni10 型不锈钢，以及工作温度低于 300℃的耐蚀不锈钢	≤0.04	≤1.0	1.0～2.5	9.0～11.0	18.0～21.0		≥515	≥35	相当于 AWS E308LT－3
YA102－1	1.6 2.0	钛钙型渣系，CO_2 气保护药芯焊丝，用于焊接工作温度低于 300℃的 0Cr19Ni9、0Cr19Ni11Ti 不锈钢以及堆焊不锈钢表面层。	≤0.08	≤1.0	1.2～2.5	9.0～11.0	18.0～21.0		≥550	≥35	相当于 AWS E308T－1
YA107－1	1.6 2.0	低氢型渣系，CO_2 气保护药芯焊丝，用于焊接工作温度低于 300℃的 0Cr19Ni9、0Cr19Ni11Ti 不锈钢以及堆焊不锈钢表面层。	≤0.08	≤1.0	1.0～2.5	9.0～11.0	18.0～21.0		≥550	≥35	相当于 AWS E308T－1
YA132－1	1.6 2.0	钛钙型渣系，CO_2 气保护药芯焊丝，用于焊接重要的含钛不锈钢，如 0Cr19Ni11Ti 等。	≤0.08	≤1.0	1.0～2.5	9.0～11.0	18.0～21.0	Nb＝8C～1.0	≥515	≥30	相当于 AWS E347T－1
YA302－1	1.6 2.0	氧化钛型渣系，CO_2 气体保护药芯焊丝，可全位置焊，用于焊接同类不锈钢以及低碳钢和不锈钢、不锈钢复合板的焊接。	～0.05	～0.54	～1.31	～12.61	～24.00		～600	～33	相当于 AWS E309T－1
YA202－1	1.6 2.0	氧化钛型渣系，CO_2 气体保护药芯焊丝，可全位置焊，用于焊接同类不锈钢	～0.049	～0.58	～1.58	～12.40	～19.50	Mo～2.40	～560	～40	相当于 AWS E316T－1

由于我国药芯焊丝标准目前只有 GB 10045—88 碳钢药芯焊丝标准，不锈钢药芯焊丝标准正在修订中，尚未正式出版，故不作详细介绍。

我国不锈钢药芯焊丝的品种还相当有限，美国、日本等国家的不锈钢药芯焊丝生产已基本系列化。我国不锈钢药芯焊丝与美国、日本等国家的不锈钢药芯焊丝对照如表 4.5-17 所示。



表 4.5-17　国内外不锈钢药芯焊丝对照表

中国		美国		日本		韩国	瑞典
牌号	北京钢研	AWS	林肯	JIS	神钢	现代	ESAB
YG207－2		E410T－3		YF410	DW－410Nb		
YG317－1		E430T－1		YF430	DW－430Nb	SF－430	
YA002－2		E308LT－3	Blue Max FC－308L	YF308L	DW－308L	SW－308L Cored	
YA102－1	GL－YA102（Q）	E308T－1		YF308	DW－308		OK14.17
YA107－1		E308T－1		YF308	DW－308H		
YA132－1	GL－YA132（Q）	E347T－1		YF347	DW－347	SW－347 Cored	
YA302－1	GL－YA302（Q）	E309T－1	Blue Max FC－309L	YF309	DW－309	SW－309L Cored	
YA202－1	GL－YA202（Q）	E316T－1	Blue Max FC-316L	YF316	DW－316	SW－316L Cored	

（4）不锈钢焊剂

不锈钢埋弧焊作用的焊剂，根据制造方式不同，基本上可以分为两大类：熔炼焊剂和烧结焊剂。

1）不锈钢熔炼焊剂　我国熔炼焊剂的牌号以“焊剂”的汉语拼音“HJ”表示，后面的第一位数字表示 MnO 的含量，如表 4.5-18 所示；第二位数字表示 SiO_2 和 CaF_2 的含量，如表 4.5-19 所示，第三位数字表示同一类型焊剂的不同编号，按 0、1、2、…、8、9 顺序排列。

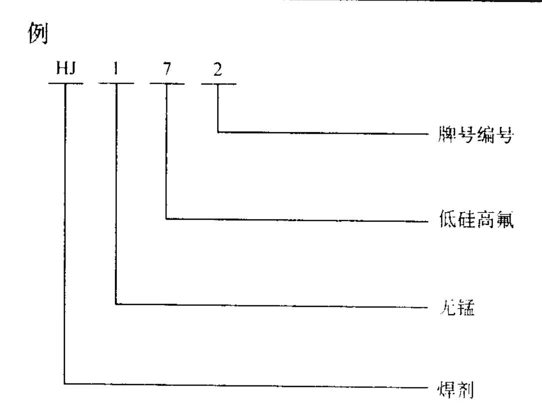
表 4.5-18　焊剂牌号中 MnO 含量的划分

牌号	焊剂类型	w（MnO）/%
HJ1××	无锰	<2
HJ2××	低锰	2～5
HJ3××	中锰	16～30
HJ4××	高锰	>30

表 4.5-19　焊剂牌号中 SiO_2 和 CaF_2 含量的划分

牌号	焊剂类型	w（SiO_2）/%	w（CaF_2）/%
HJ×1×	低硅低氟	<10	<10
HJ×2×	中硅低氟	10～30	<10
HJ×3×	高硅低氟	>30	<10
HJ×4×	低硅中氟	<10	10～30
HJ×5×	中硅中氟	10～30	10～30
HJ×6×	高硅中氟	>30	10～30
HJ×7×	低硅高氟	<10	>30
HJ×8×	中硅高氟	10～30	>30

例



不锈钢埋弧焊用熔炼焊剂的牌号和主要化学成分及主要用途如表 4.5-20 所示。

不同类型的焊剂，其冶金性能不同。HJ260 焊剂的焊缝金属有微量的增碳现象，且铬的烧损较为严重，因为 HJ260 焊剂中的 SiO_2 较高，有较强的氧化性。HJ107 焊剂也有一定的氧化性，但焊剂中含有不定量的 Cr_2O_3，使铬的烧损量减少。“772”焊剂的氧化性较低，合金元素烧损极少，也无增碳现象。

几种不锈钢熔炼焊剂的工艺性能都不错，电弧稳定、焊缝成形美观、脱渣性好。“772”焊剂的吸湿性较大，对焊剂的烘干要求严格，HJ107 和 HJ260 焊剂的抗气孔性能较好，尤其是 HJ107 中含有较多的 CaF_2 并加入了 Na_3AlF_6（水晶石）有较好的抗气孔和抗裂纹性能。HJ151 焊剂中还有一种 HJ151Nb 焊剂，主要是解决含 Nb 不锈钢焊接时脱渣难的问题。

表 4.5-20　不锈钢埋弧焊用熔炼焊剂牌号及主要用途

焊剂牌号	焊剂类型	焊剂化学成分（质量分数）/%	焊剂形状	烘干温度与时间	主　要　用　途
HJ150	无锰中硅中氟	SiO_2=21～23；CaF_2=25～33；Al_2O_3=28～32；MgO=9～13；CaO=3～7；R_2O≤3 FeO≤1.0；P、S≤0.08	灰色至天蓝色，玻璃状或白色浮石状颗粒，粒度为 2.5～0.45 mm（8～40目）	300～450℃ 烘焙 2 h	配合焊丝 H1Cr13、H2Cr13、H3Cr2W8 等，可堆焊轧辊等，直流正接，工艺性能良好，脱渣容易
HJ151	无锰中硅中氟	SiO_2=24～30；CaF_2=18～24；Al_2O_3=22～30；MgO=13～20；CaO≤6；FeO≤1.0；S≤0.07；P≤0.08	蓝色至深灰色，浮石状颗粒，粒度为 2～0.28 mm（10～60 目）	250～300℃ 烘焙 2 h	配合焊丝 H0Cr2Ni10、H0Cr21Ni10Ti、H00Cr24Ni12Nb、H00Cr21Ni10Nb，可用于核容器及石化设备耐蚀堆焊及构件焊接，直流正接，工艺性能好，脱渣容易，增碳少，铬烧损较少



续表 4.5-20

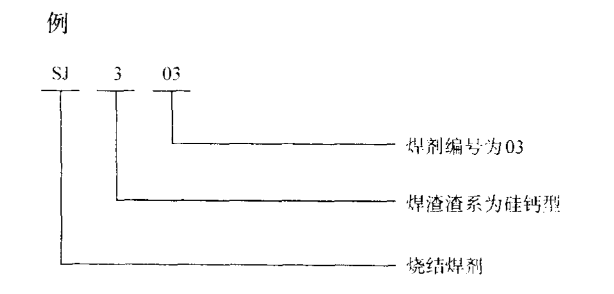
焊剂牌号	焊剂类型	焊剂化学成分（质量分数）/%	焊剂形状	烘干温度与时间	主要用途
HJ172	无锰低硅高氟	$CaF_2=45\sim50$；$Al_2O_3=28\sim35$；$MnO=1\sim2$；$SiO_2=3\sim6$；$CaO=2\sim5$；$ZrO_2=2\sim4$；$NaF=2\sim3$；$R_2O\leqslant3$	白色至浅灰色，半透明玉石状颗粒，粒度为 2～0.28 mm（10～60 目）	350～400℃ 烘培 2 h	配合 Cr12 型热强马氏体不锈钢丝，H0Cr21Ni10、H0Cr20Ni10Nb，可焊高铬马氏体热强钢及含铌铬镍不锈钢，直流正接，工艺性能良好，焊接含铌或含钛不锈钢时不粘渣
HJ107	无锰中硅中氟	$SiO_2=26\sim30$；$Al_2O_3=24\sim30$；$MgO=13\sim17$；$CaF_2=20\sim26$；$Ca\leqslant4$；$Cr_2O_3\leqslant4.5$；$Na_3AlF_6\leqslant3$	灰黑色浮石状焊剂，松装比小，约为 0.9 g/cm³	300～350℃ 烘培 2 h	可用于不锈钢埋弧焊和堆焊不锈钢复合层，配合适当的焊丝或焊带，可获得优质堆焊层
HJ260	低锰高硅中氟	$MnO=2\sim4$；$SiO_2=29\sim34$；$CaF_2=20\sim25$；$Al_2O_3=19\sim24$；$MgO=15\sim18$；$CaO=4\sim7$；$FeO\leqslant1.0$；S、$P\leqslant0.07$	灰色，玻璃状颗粒，粒度为 2～0.28 mm（10～60 目）	300～400℃ 烘培 2 h	配合 H0Cr21Ni10、H0Cr20Ni10Ti 等不锈钢焊丝，焊接相应的耐酸不锈钢，也可用于轧辊堆焊，直流正接，脱渣容易，铬烧损较多
宝鸡钢管厂"772"焊剂	无锰无硅高氟	$Al_2O_3=28\sim33$；$CaF_2=45\sim50$；$NaF=3\sim4$；$ZrO_2=3.5\sim4.5$；S、$P\leqslant0.05$	白色，玻璃状颗粒	300～400℃ 烘培 2 h	配合相应的焊丝，可用于焊接奥氏体－铁素体不锈钢及纯奥氏体不锈钢

2）不锈钢烧结焊剂　我国烧结焊剂的牌号用"烧结"的汉语拼音"SJ"表示，后面由三位数字组成：第一位数字表示焊剂焊渣渣系，如表 4.5-21 所示；第二、三位数字表示同一渣系类型焊剂的不同牌号，按 01、02、03……09 顺序编排。

表 4.5-21　烧结焊剂熔渣渣系

牌号	焊渣渣系类型	主要化学成分（质量分数）/%
SJ1××	氟碱型	$CaF_2\geqslant15$；$CaO+MgO+MnO+CaF_2>50$；$SiO_2<20$
SJ2××	高铝型	$Al_2O_3\geqslant20$；$Al_2O_3+CaO+MgO>45$
SJ3××	硅钙型	$CaO+MgO+SiO_2>60$
SJ4××	硅锰型	$MnO+SiO_2>50$
SJ5××	铝钛型	$Al_2O_3+TiO_2>45$
SJ6××	其他型	未规定
SJ7××		

例



不锈钢埋弧焊用烧结焊剂的牌号和主要化学成分及主要用途如表 4.5-22 所示。

此外，还有一种粘接焊剂，又称陶质焊剂，我国生产的不锈钢粘接焊剂只有一种牌号：SJ524，主要用于超低碳不锈钢带极埋弧堆焊，工艺性能优良，堆焊金属具有优良的抗晶蚀性能和抗脆化性能，可用于石油、化工容器、反应堆压力壳内壁要求耐蚀的衬里带极堆焊。

表 4.5-22　不锈钢埋弧焊烧结焊剂及主要用途

焊剂牌号	焊剂类型	焊剂化学成分（质量分数）/%	焊剂形状、粒度/mm	烘干温度与时间	主要用途
SJ303	硅钙型带极埋弧焊焊剂，碱度为 1.0	$SiO_2+TiO_2\approx40$；$MgO+CaO\approx30$；$MnO+Al_2O_3\approx20$；$CaF_2\approx10$	粒度为 2～0.28（10～60 目）	300～350℃ 烘培 2 h	配合 H00Cr25Ni12、H00Cr21Ni10 等焊丝可用于堆焊耐蚀不锈钢
SJ601	碱性焊剂，碱度约 1.8	$SiO_2+TiO_2=5\sim10$；$MnO+Al_2O_3=30\sim40$；$CaO+MgO=6\sim10$；$CaF_2=40\sim50$；$S.P\leqslant0.06$	球形颗粒，粒度为 2～0.18（10～80 目）	300～350℃ 烘培 2 h	配合 H00Cr21Ni10、H0Cr21Ni10、H0Cr21Ni10Ti、H00Cr19Ni12Mo2 焊丝用于焊接 18-8 型和超低碳不锈钢，直流正接，工艺性能良好，几乎不增碳，铬烧损少
SJ602	带极堆焊用焊剂	$CaO+MgO+CaF_2\approx55$；$Al_2O_3+MnO\approx30$；$SiO_2+TiO_2\approx10$	细粉状颗粒	300～350℃ 烘培 2 h	配合 H00Cr24、H00Cr20Ni10Nb、H00Cr19Ni12Mo2 焊带，用于核容器、加氢反应器的堆焊
SJ602	碱性焊剂，碱度约 1.8	$SiO_2+TiO_2=5\sim8$；$MnO+Al_2O_3=30\sim35$；$CaO+MgO=4\sim8$；$CaF_2=40\sim50$；$S.P\leqslant0.06$	浅绿色球形颗粒，粒度为 2～0.18（10～80目）	300～350℃ 烘培 2 h	配合 H0Cr21Ni10、H0Cr21Ni10Ti 超低碳不锈钢丝，焊接 18-8 型不锈钢及超低碳不锈钢，进行丝极多道焊



续表 4.5-22

焊剂牌号	焊剂类型	焊剂化学成分（质量分数）/%	焊剂形状，粒度/mm	烘干温度与时间	主要用途
SJ606	带极堆焊用焊剂，碱度为1.0	$MnO+SiO_2=20\sim30$；$MgO+CaF_2+CaO=30\sim40$；$Al_2O_3+Fe_2O_3=25\sim35$；其他合金≈10	粒度为1.6～0.25（12～65目）	350～400℃烘焙2 h	与308L、309L焊带相匹配，"一剂二带"堆焊，可用于石油、化工容器上堆焊，也可用于核电蒸发器内壁要求耐蚀的衬里带极堆焊
SJ641	碱性焊剂碱度约2.0	$SiO_2+TiO_2=20\sim25$；$MnO+Al_2O_3=20\sim22$；$CaO+MgO=15\sim20$；$CaF_2=20\sim25$；S、P≤0.06	珠形颗粒，粒度为2～0.18（10～80目）	300～350℃烘焙2 h	配合H0Cr21Ni10、H0Cr21Ni10Ti及超低碳不锈钢丝，焊接18-8型不锈钢及超低碳不锈钢
SJ608	碱性焊剂	$SiO_2+TiO_2\leq20$；$CaO+MgO=6\sim10$；$Al_2O_3+MnO=30\sim40$；$CaF_2=40\sim50$	浅绿色颗粒，粒度为2～0.28（10～60目）	300～350℃烘焙2 h	配合H0Cr21Ni10Ti、H0Cr21Ni10、H00Cr21Ni10等焊丝，焊接奥氏体不锈钢及相应级别的低温船用钢，可交直流两用，增碳及铬的烧损都很少
SJ701	碱性焊剂	$SiO_2+TiO_2=50\sim60$；$CaO+MgO=25\sim35$；$Al_2O_3+MnO=5\sim15$；$CaF_2=5\sim15$	深灰色颗粒，粒度为2～0.28（10～60目）	300～400℃烘焙2 h	配合H0Cr21Ni10Ti、H0Cr21Ni10等焊丝，焊接相应的耐蚀不锈钢，特别用于1Cr19Ni9Ti含钛不锈钢的焊接，可交直流两用，钛的烧损较少

4 奥氏体不锈钢的焊接

4.1 奥氏体不锈钢焊接时的主要问题

奥氏体不锈钢与其他类型不锈钢相比，焊接性最好，但是由于奥氏体不锈钢自身的一些特殊性能，焊接时仍然会出现如下的一些问题。

(1) 热裂纹问题

奥氏体不锈钢焊接时热裂纹倾向比较大，这是奥氏体不锈钢焊接时的主要问题之一。

由于奥氏体不锈钢的热导率小、线膨胀系数大，焊接残余应力比较大；由于奥氏体不锈钢的热导率小、电阻比较大，熔池容易过热，结晶时很容易形成方向性强的粗大柱状晶组织；另外奥氏体不锈钢由于含有Ni及其他一些合金元素和杂质，如S、P、Sn、Sb、Si、B、Nb等很容易形成低熔点共晶体和化合物，同时很容易形成结晶偏析，由于这些因素的综合作用，奥氏体不锈钢焊接时，很容易产生热裂纹，尤其是稳定型的奥氏体不锈钢（单一奥氏体不锈钢），热裂纹的倾向更大。

奥氏体不锈钢焊接时，不仅容易产生结晶裂纹，由于同样的原因，在熔合区的母材侧，还会产生液化裂纹。且稳定型不锈钢产生液化裂纹的倾向性比亚稳定型不锈钢大。

(2) 接头的抗蚀性能问题

奥氏体不锈钢焊接结构往往使用在具有腐蚀介质的环境中，在服役过程中，常发现焊接接头抗蚀性能降低问题，除了由于焊接材料选择不当，造成焊缝的集中腐蚀以外，常见的是不锈钢焊接接头的晶间腐蚀、点蚀、坑蚀、缝隙腐蚀等局部腐蚀，有时也会出现熔合区刀状腐蚀。

以外，不锈钢焊接接头在含有Cl^-离子腐蚀介质的环境中服役时，还会出现应力腐蚀破裂现象。

(3) 接头的脆化问题

在一般常温情况下，奥氏体不锈钢焊接接头的强度及塑韧性都是容易得到保证的，但在低温或高温情况下，有时会出现脆化问题。

1) 奥氏体不锈钢焊接接头的低温脆化问题　亚稳定18-8型奥氏体不锈钢焊接时，焊缝中往往含有少量的铁素体，使接头发生低温脆化现象。

从表4.5-23可以看出，奥氏体不锈钢焊缝中的少量铁素体将使接头的低温韧性恶化，而单一的奥氏体焊缝可以避免接头的低温脆化。

表 4.5-23　奥氏体不锈钢焊缝组织对低温韧性的影响

焊缝金属主要化学成分（质量分数）/%						焊缝组织	a_K/J·cm^{-2}	
C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti		+20℃	-196℃
0.08	0.57	0.44	17.6	10.8	0.16	$\gamma+\delta$	121	46
0.15	0.22	1.50	25.5	18.9	—	γ	178	157

2) 奥氏体不锈钢焊接接头的高温脆化问题

奥氏体不锈钢焊缝中如果含有较多的铁素体化元素或较多的δ相时，将会发生显著的高温脆化现象。例如1Cr19Ni10VNb奥氏体不锈钢，当焊缝中含有25%的δ相时，焊态下U形缺口冲击韧性A_K值为83.5 J/cm^2；650℃加热2 h后，A_K为70.5 J/cm^2；650℃加热200 h后A_K值只有12.8 J/cm^2；750℃加热2 h后，A_K为24.5 J/cm^2。试验表明：长期高温下工作的奥氏体不锈钢焊缝中的δ相必须小于5%。

奥氏体不锈钢焊缝中含有较多的δ相引起高温脆化的原因，通常认为是发生$\delta\rightarrow\sigma$转变的结果。其实就是单相γ焊缝在高温下也有可能发生$\delta\rightarrow\sigma$转变。例如：25-20奥氏体不锈钢焊缝，当Cr与Si的含量偏上限，而C、Ni含量偏下限时，经800～900℃加热，就很容易发生σ相沿晶界析出而脆化。

(4) 焊接变形问题

奥氏体不锈钢由于热导率小而线膨胀系数大，在自由状态下焊接时，容易产生较大的焊接变形。特别是薄板奥氏体不锈钢焊接时，变形会相当严重。

4.2 奥氏体不锈钢焊接工艺特点

(1) 奥氏体不锈钢焊接方法的选择

一般地说，奥氏体不锈钢的焊接性较好，几乎所有的熔焊方法都可以采用。其他一些特种焊接方法，如摩擦焊、电阻焊、缝焊、闪光焊、激光焊、电子束焊及钎焊等也可使用。



但是，由于奥氏体不锈钢的线膨胀系数较大，焊接变形较大；并且含合金元素较多，有些合金元素很容易烧损，因此，在选择焊接方法时，要求保护性好，焊接能量比较集中。所以焊接方法的最佳选择是惰性气体保护焊，如氩弧焊，氩气保护药芯焊丝焊接，以及工程上常采用的氩弧焊打底，手弧焊填充的焊接工艺。

手弧焊方便灵活，适应于各种焊接位置和不同板厚，特别是在安装工程中，使用范围较广，但焊接效率较低，劳动强度较大。埋弧焊效率较高，适合于中厚板规则焊缝的平焊位置的焊接。埋弧焊由于热输入量较大、熔深较大、焊接时要特别注意防止热裂纹问题，还要注意焊丝和焊剂的配合问题。钨极氩弧焊，热输入小，特别适合薄板和薄壁管件的焊接，微弧等离子弧焊，或微弧脉冲钨极氩弧焊，可焊厚度小于1 mm的奥氏体不锈钢。熔化极氩弧焊，特别是富氩混合气体熔化极氩弧焊是焊接奥氏体不锈钢的高效优质方法，对于8～12 mm的不锈钢采用等离子弧焊，可以不开坡口。

(2) 奥氏体不锈钢焊接材料的选择

奥氏体不锈钢焊接时填充材料选择的基本原则是焊缝的化学成分与母材相似。对于 18-8 型亚稳定奥氏体不锈钢，为了保证焊缝金属有足够的抗热裂性能及抗晶蚀性能，要求焊缝成分能保证获得 5%～8% δ 相。在一般情况下，为确保焊接接头的抗蚀性能，要求尽可能降低焊缝金属的含碳量和加入 Nb、Ti 等稳定碳化物元素。有时也选用超合金化的焊接材料，例如：00Cr18Ni12Mo2 类型的焊接材料焊接 00Cr19Ni10 不锈钢；采用 W_{Mo} 达 9% 的镍基焊接材料焊接 Mo6 型奥氏体不锈钢。

表 4.5-12、表 4.5-14、表 4.5-16 分别列出了常用的不锈钢焊条、焊丝及药芯焊丝，可供选用。

选择填充材料时，还要考虑到焊接工艺方法的影响。例如，选择埋弧焊丝时，同时要考虑到焊丝和焊剂的配合使用问题；选择气体保护焊丝时，要考虑到可能产生的渗碳和合金元素的烧损问题。

(3) 奥氏体不锈钢工艺参数的选择

由于奥氏体不锈钢的热导率较小、电阻比较大，因此焊条及焊丝的熔化系数较大，熔深较大，熔池容易过热，产生粗晶、热裂，一般要求采用较小的焊接线能量。

手弧焊时，奥氏体不锈钢焊条容易“发红”失效，要求焊接电流比普通低合金钢小 10%～20%，焊接电流的选择建议采用下列公式：

$$I = kd$$

式中，I 为焊接电流，A；k 为经验系数，A/mm，见表 4.5-24；d 为焊条直径，mm。

表 4.5-24　焊接电流选用的经验系数 k

焊条直径 d/mm	1.6	2～2.5	3.2	4～5
经验系数 k/A·mm^{-1}	15～25	20～30	25～35	30～40

埋弧焊时，焊接工艺参数主要有：焊接电流、电弧电压、焊丝直径、送丝速度、焊接速度等。

焊接电流主要是影响熔深，焊接电流越大，熔深越大；电弧电压随弧长而变，电弧拉长，电弧电压升高，熔宽增加，熔深减小；当焊接电流和电弧电压一定时，焊接速度增加，线能量减小，熔宽和熔深都减小；焊丝直径加粗，在焊接电流不变的情况下，熔宽增加，熔深减小。

埋弧焊的焊接参数的选择，不能单项考虑，需进行综合分析，制定最佳参数配合。

表 4.5-25 列出的埋弧焊规范参数可供参考。

表 4.5-25　18-8 型奥氏体不锈钢埋弧焊规范参数

焊件厚度/mm	装配间隙/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min^{-1}	备注
6	1.5～2.0	650～700	34～38	76.7	在焊剂垫上进行单面焊，焊丝直径 ϕ5 mm
8	2.0～3.0	750～800	36～38	76.7	
10	2.5～3.5	850～900	38～40	51.7	
12	3.0～4.0	900～950	38～40	41.7	
8	1.5	500～600	32～34	76.7	双面焊，第一道焊缝在焊剂垫上进行，焊丝直径 ϕ5 mm
10	1.5	600～650	34～36	70.0	
12	1.5	650～700	36～38	60.0	
16	2.0	750～800	38～40	51.7	
20	3.0	800～850	38～40	41.7	
30	6.0～7.0	850～900	38～40	26.7	
40	8.0～9.0	1 050～1 100	40～42	20.0	

钨极氩弧焊时，焊接参数主要有：钨极直径、焊接电流、焊接速度、氩气流量等。

钨极直径与电源的类型及焊接电流的关系可参阅表 4.5-26。

表 4.5-26　钨极直径与焊接电流的关系

钨极直径/mm	直流正极/A		交流/A	
	纯钨	钍钨、铈钨	纯钨	钍钨、铈钨
0.5	2～20	2～20	2～15	2～15
1.0	10～75	10～75	15～55	15～70
1.6	40～130	60～150	45～90	60～125
2.0	75～180	100～200	65～125	85～160
2.5	130～230	160～250	80～140	120～210
3.2	160～310	225～330	150～190	150～250
4.0	270～450	350～480	180～260	240～350
5.0	400～625	500～675	240～350	330～460

不加填充材料的奥氏体不锈钢钨极氩弧焊焊接参数的选择见表 4.5-27。

表 4.5-27　不加填充材料的奥氏体不锈钢钨极氩弧焊焊接参数

板厚/mm	接头形式	钨极直径/mm	焊接电流/A	焊接速度/cm·min^{-1}	氩气流量/L·min^{-1}	备注
0.5	I形	2	60～70	48～52	7～8	焊件装于气压琴键式纵缝焊夹具上，实现单面焊双面成形
0.8		2	60～70	40～50	8	
1.0		2.5	75～85	35～40	8	
1.2		2.5	110～120	30～35	8	

采用自动填充丝的钨极氩弧焊奥氏体不锈钢的焊接参数参阅表 4.5-28。

表 4.5-28 自动填丝钨极氩弧焊奥氏体不锈钢的焊接参数

板厚/mm	接头形式	钨极直径/mm	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	送丝速度/cm·min⁻¹	焊接速度/cm·min⁻¹	喷嘴直径/mm	氩气流量/L·min⁻¹	备注
0.8	I形	2	0.8	85~95	7.3~7.7	24~26	46~50	8	8~9	背面加铜垫板，在琴键式夹具上进行单面焊双面成形
1.0		3	0.8	100~110	7.8~8.2	26~28	42~46	12	9~10	
1.2		3	0.8	120~140	8~8.4	28~30	38~42	12	9~10	
1.5		3	1.2	150~170	8.2~8.5	12~14	34~36	16	10~11	
1.8		3	1.2	200~220	8.4~8.6	14~16	32~34	16	10~11	
2.0		4	1.6	240~260	8.5~8.7	8.5~9.0	30~32	16	11~12	
2.5		4	1.6	290~310	8.6~8.8	9.0~9.5	28~30	16	11~12	
3.0		5	1.6	340~360	9.0~9.2	9.5~10.0	26~28	16	11~12	

采用手工填丝钨极氩弧焊焊接奥氏体不锈钢的焊接参数参阅表 4.5-29。

表 4.5-29 手工填丝钨极氩弧焊奥氏体不锈钢焊接参数

板厚/mm	接头形式	钨极直径/mm	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min⁻¹	喷嘴直径/mm	氩气流量/L·min⁻¹	备注
0.5	I形	1.0		15~20	8~12	20~30	8	3~4	采用直流正接，较大电流适用于在夹具垫板上焊接，较小电流适用于悬空焊接（不用垫板）
0.8		1.6	1.0	20~30					
1.0		2.0	1.6	30~50				5~6	
1.5		2.0	1.6	40~70					
2.0		3.0	2.0	80~110					
2.5	V形装配间隙 $p=0\sim0.5$ mm 坡口角度 $\alpha=60°\sim70°$	3.0	2.0	95~130			12	6~8	
3.0		3.0	2.5	110~160					
4.0		3~4	3.0	120~180		15~25		8	
>4.0		4~5	3.0	150~250					

采用钨极脉冲氩弧焊焊接奥氏体不锈钢薄板对接焊缝时的焊接参数参阅表 4.5-30。

采用钨极脉冲氩弧焊全位置焊接奥氏体不锈钢管接头的焊接参数参阅表 4.5-31。

表 4.5-30 钨极脉冲氩弧焊奥氏体不锈钢薄板的焊接参数

板厚/mm	焊接电流/A		持续时间/s		脉冲频率/Hz	焊接速度/cm·min⁻¹	弧长/mm
	脉冲	基值	脉冲	基值			
0.3	20~22	5~8	0.06~0.08	0.06	8	50~60	0.6~0.8
0.5	55~60	10	0.08	0.06	7	55~60	0.8~1.0
0.8	85	10	0.12	0.08	5	80~100	0.8~1.0

表 4.5-31 钨极脉冲氩弧焊全位置焊接奥氏体不锈钢焊接参数

管径/mm	焊接电流/A		持续时间/s		弧长/mm	焊接速度/cm·min⁻¹	氩气流量/L·min⁻¹	
	脉冲	基值	脉冲	基值			喷嘴	管内
$\phi6\times1$	23~42	11~13	0.1	0.1	0.7~0.9	16~19	14~16	2.5~3.5
$\phi8\times1$	18~38	11~13	0.1	0.1	0.7~0.9	12~15	15~20	2.5~3.5
$\phi14\times1.5$	41~60	19~27	0.2	0.2	0.7~0.9	13~16	15~20	2.0~3.0
$\phi18\times1$	65~90	20~25	0.3	0.4	0.7~1.2	8~10	7~10	5.0~7.0
$\phi28\times1$	75~110	25~30	0.4	0.5	0.7~1.2	8~10	7~10	5.0~7.0

采用熔化极短路过渡氩弧焊焊接奥氏体不锈钢的焊接参数参阅表 4.5-32。

采用熔化极喷射过渡氩弧焊奥氏体不锈钢的焊接参数，参阅表 4.5-33。

表 4.5-32 熔化极短路过渡氩弧焊奥氏体不锈钢焊接参数

板厚/mm	接头形式	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min⁻¹	送丝速度/cm·min⁻¹	氩气流量/L·min⁻¹
1.6	T型	0.8	85	15	42.5~47.5	460	15
2.0			90		32.5~37.5	480	
1.6	对接		85		37.5~52.5	460	
2.0			90		28.5~31.5	480	



表 4.5-33 熔化极喷射过渡氩弧焊奥氏体不锈钢焊接参数

板厚/mm	坡口尺寸/mm	层数	焊接位置	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min^{-1}	送丝速度/cm·min^{-1}	氩气流量/L·min^{-1}	备注
3	0.2	1	水平	1.6	200~240	22~25	40~55	350~450	14~18	永久垫板
			立		180~220	22~25	35~50	300~400		
6	0.2	2 (1:1)	水平	1.6	220~260	23~26	30~50	400~500	14~18	
			立		200~240	22~25	25~45	350~500		
12	0~2, 0.2	5 (4:1) 6 (5:1)	水平	1.6	240~280	24~27	20~35	450~650	14~18	括弧内数字说明双面焊时每面的层数
			立		220~260	23~26	20~40	400~500		
22	0~1, 2/3, 1/3	11 (7:4) 14 (10:4)	水平	1.6	240~280	24~27	20~35	450~650	14~18	
			立		220~240	22~25	20~40	350~450		
38	2~3, 0~2	18 (9:9) 22 (11:11)	水平	1.6	280~340	26~30	15~30	500~700	14~18	
			立		240~300	24~28	15~30	450~700	18~22	

采用脉冲熔化极氩弧焊焊接奥氏体不锈钢单面焊双面成形时的焊接规范参数参阅表 4.5-34。

表 4.5-34 脉冲熔化极氩弧焊奥氏体不锈钢单面焊双面成形焊接参数

板厚/mm	坡口尺寸/mm	焊丝直径/mm	脉冲电流/A	基值电流/A	脉冲频率/Hz	电弧电压/V	焊接速度/cm·min^{-1}	焊丝伸出长度/mm	氩气流量/L·min^{-1}
4	90°, 2	1.4	130~140	30	50	24	36	10	6/10
5		1.4	180	30	100	25	40~42	12	6/9
6		1.4	210	20	100	26	29	12	5/9
		1.6	160~180	30~50	50	26	25	12	9/16

采用脉冲熔化极氩弧焊焊接奥氏体不锈钢角焊缝时的焊接参数参阅表 4.5-35。

表 4.5-35 脉冲熔化极氩弧焊奥氏体不锈钢角焊缝焊接参数

板厚/mm	焊脚尺寸/mm	焊接位置	焊丝直径/mm	焊丝伸出长度/mm	焊接平均电流/A	电弧电压/V	氩气流量/L·min^{-1}	焊接方向
1.5~2.0	2~3	平焊 立焊 仰焊	1.2	8~12	65~130 60~100 60~120	18~20.5 18~19.0 18~19.0	10~12	自上向下
3	3~4	平焊 立焊 仰焊	1.2~1.6	10~14	90~140 80~110 90~130	19.0~21.5 18.5~19.5 18.5~19.5	12~14	自上向下
4	4	平焊 立焊 仰焊	1.6	14~17	130~170 120~140 130~160	19.6~22 19~20 19~20	14~16	自上向下
5~6	5	平焊 立焊 仰焊	1.6~2.0	16~20	160~210 140~160 140~160	20.0~22.5 19.0~20.5 19.0~20.5	16~18	自下向上
7~8	5~6	平焊 立焊 仰焊	2.0	18~22	200~280 150~180 180~250	20.5~23.0 20.0~21.0 19.5~20.5	18~20	自下向上

采用脉冲熔化极混合气体（Ar + O_2）保护焊焊接奥氏体不锈钢的焊接参数见表 4.5-36。

表 4.5-36 脉冲熔化极（Ar + O_2）混合气体保护焊奥氏体不锈钢焊接参数

板厚/mm	接头形式	焊丝直径/mm	脉冲频率/Hz	平均焊接电流/A	电弧电压/V	气体流量/L·min^{-1} Ar	气体流量/L·min^{-1} O_2
4	75°, 0.5~1, 2	1.6	50	140 140	24 24	25	0.25
6	75°, 1.5~2, 2	1.6	100	200 210	28 28	25	0.25
6	75°, 1, 2, 3, 1.5~2.5, 2	1.6	100	180~190 200~210 200	26~27 27~28 28~29	25	0.25
8	75°, 2~2.5, 2	1.6	100	210 220~230 200~210	26~27 27~28 28~29	25	0.25
16	75°, 90°, 6, 2	1.6	100	230 240 250 260	29 30 31 31	25	0.30

采用脉冲熔化极混保气体（Ar + CO_2）保护焊焊接奥氏体不锈钢的焊接参数参阅表4.5-37。

表4.5-37　脉冲熔化极（Ar + CO_2）混合气体保护焊奥氏体不锈钢焊接参数

板厚/mm	接头形式	焊接电流 脉冲	焊接电流 维持	电弧电压/V	焊接速度/cm·min⁻¹	送丝速度/cm·min⁻¹	气体流量/L·min⁻¹ Ar	气体流量/L·min⁻¹ CO_2	备注
3	0~1.3	150~170	50	24	65	550	17	0.15~0.25	单面焊1层
4	1~1.3	180	60	24	65	700	17	0.2	单面焊1层
5	1~1.6	200~220	50~60	24	65	860	17	0.2~0.5	单面焊1层
8	1.3~1.6	200	60	24~26	58	800	17	0.2	双面焊(正反各1层)
8	60°~70° 0~1	200	60	24	65 46	700	17	0.2	单面焊1层

采用药芯焊丝焊接奥氏体不锈钢时有自保护和气保护或渣保护两种形式，目前我国自保护药芯焊丝尚在研制开发过程中，气保护药芯焊丝常用的保护气体有氩气、CO_2 气体及 Ar + CO_2 混合保护气体。焊接奥氏体不锈钢时多采用 Ar + 少量 CO_2 混合保护气体，现介绍一组用YA002-2药芯焊丝焊接奥氏体不锈钢的焊接参数，参阅表4.5-38。

表4.5-38　YA002-2药芯焊丝焊接奥氏体不锈钢焊接参数

焊丝直径/mm	焊丝伸出长度/mm	电弧电压/V	焊接电流/A
1.2	10~15	26~32	100~180
1.6	13~25	26~32	150~275
2.0	20~32	26~32	200~300
2.4	25~28	26~32	225~350

采用等离子弧焊接奥氏体不锈钢时，穿透型和熔透型的等离子弧焊焊接参数，参阅表4.5-39和表4.5-40。

表4.5-39　穿透型等离子弧焊奥氏体不锈钢焊接参数

板厚/mm	接头形式	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min⁻¹	气体成分(体积分数/%)	气体流量/L·min⁻¹ 离子气	气体流量/L·min⁻¹ 保护气
2.4	I形	115	30	61	Ar95 + 5% H_2	2.8	17
3.2		145	32	76		4.7	17
4.8		165	36	41		6.1	21
6.4		240	38	36		8.5	24

表4.5-40　熔透型等离子弧焊奥氏体不锈钢焊接参数

板厚/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min⁻¹	气体流量/L·min⁻¹ 离子气	气体流量/L·min⁻¹ 保护气	喷嘴直径/mm	备注
0.025	0.3	—	12.7	0.2	8(99% Ar + 1% H_2)	0.75	卷边焊
0.075	1.6	—	15.2	0.2	8(99% Ar + 1% H_2)	0.75	
0.125	1.6	—	37.5	0.28	7(99.5% Ar + 0.5% H_2)	0.75	
0.175	3.2	—	77.5	0.28	9.5(96% Ar + 4% H_2)	0.75	
0.25	5	20	32.0	0.5	7Ar	0.6	
0.2	4.3	25	—	0.4	5Ar	0.8	
0.2	4	26	—	0.4	6Ar	0.8	对接焊（背后有铜垫）
0.1	3.3	24	37.0	0.15	4Ar	0.6	
0.25	6.6	24	27.0	0.6	6Ar	0.8	
1.0	2.7	25	27.5	0.6	11Ar	1.2	
0.25	6	—	20.0	0.28	9.5(99% Ar + 1% H_2)	0.75	
0.75	10	—	12.5	0.28	9.5(99% Ar + 1% H_2)	0.75	
1.2	13	—	15.0	0.42	7(98% Ar + 2% H_2)	0.8	
1.6	46	—	25.4	0.47	12(95% Ar + 5% H_2)	1.3	手工对接
2.4	90	—	20.0	0.7	12(95% Ar + 5% H_2)	2.2	
3.2	100	—	25.4	0.7	12(95% Ar + 5% H_2)	2.2	

采用微束等离子弧焊奥氏体不锈钢薄板时的焊接参数参阅表4.5-41。

表4.5-41　微束等离子弧焊奥氏体不锈钢焊接参数

板厚/mm	接头形式	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min⁻¹	气体流量/L·min⁻¹ 离子气	气体流量/L·min⁻¹ 保护气 96% Ar + 4% H_2	喷嘴直径/mm
0.1	I形	3.3	24	37	0.15	4	0.6
0.25		6.5	24	27	0.60	6	0.8
0.5		18.0	24	30	0.60	11	1.0
1.0		27.0	25	27.5	0.60	11	1.2

采用真空电子束焊焊接奥氏体不锈钢时的焊接参数参阅表4.5-42。

表4.5-42　电子束焊不锈钢焊接参数

板厚/mm	加速电压/kV	电子束电流/mA	焊接速度/cm·min⁻¹
1.3	25	28	50.6
2.0	55	17	170
5.6	50	140	250
8.7	50	125	100

采用 CO_2 激光焊焊接奥氏体不锈钢时的焊接参数参阅表4.5-43。

表4.5-43　CO_2 激光焊奥氏体不锈钢焊接参数

接头类型	材料	板厚/mm	焊接速度/mm·s⁻¹	熔宽/mm	深宽比	功率/kW
对接焊缝	321（0Cr18Ni10Ti）	0.13	38.1	0.45	全焊透	5
		0.25	14.8	0.71	全焊透	5
		0.42	4.7	0.76	部分焊透	5

续表 4.5-43

接头类型	材料	板厚/mm	焊接速度/mm·s⁻¹	熔宽/mm	深宽比	功率/kW
对接焊缝	17－7PH (0Cr17Ni7Al)	0.13	46.5	0.45	全焊透	5
	302 (1Cr18Ni9)	0.13	21.2	0.50	全焊透	5
		0.20	12.7	0.50	全焊透	5
		0.25	4.2	1.00	全焊透	5
		6.35	21.4	0.7	7	3.5
		8.9	12.7	1.00	3	8
		12.7	42	1.00	5	20
		20.3	21	1.00	5	20
		6.35	84.7		6.5	16
搭接焊缝	302 (1Cr18Ni9)	0.40	74.5	0.76	部分焊透	5
		0.76	12.7	0.6	部分焊透	5
		0.25	6.0	0.6	全焊透	5
角焊缝	321 (0Cr18Ni10Ti)	0.25	8.5			
端接焊缝	321 (0Cr18Ni10Ti)	0.18	36.0			
		0.25	10.6			
		0.42	6.0			
	17－7PH (0Cr17Ni7Al)	0.13	19.0			

(4) 奥氏体不锈钢焊接时需要注意的问题

① 奥氏体不锈钢焊接时应尽可能地采用短弧焊接，一方面可减少或防止 Ti、Nb、Cr、Al 等合金元素的烧损，另一方面可减少或防止飞溅。

② 奥氏体不锈钢焊接时应尽可能地减少电弧的摆动，最好不要横向摆动，采用直通焊，焊接速度要尽可能快些。

③ 奥氏体不锈钢焊接时不可随意引弧，特别要注意不可在焊件表面引弧，引弧时要有引弧板，熄弧时要有熄弧板。

④ 奥氏体不锈钢焊接时要仔细地清理坡口，保持表面光洁，每层焊缝清渣要彻底，清渣时不能用铁榔头乱敲乱打，要用木榔头或橡皮榔头，用铜丝刷清渣，不可用钢丝刷。

⑤ 焊缝交接处要错开安排。

⑥ 必要时要采取强迫冷却措施，例如水冷方式、铜垫板等以降低层间温度。

⑦ 最后一道焊缝要尽可能安排在接触腐蚀介质的一面施焊。

⑧ 奥氏体不锈钢焊接时，焊前不需要预热，因为奥氏体不锈钢的冷裂纹倾向极小，而且为防止晶粒粗化，要求提高冷却速度。

奥氏体不锈钢焊后为防止接头产生晶蚀，有时需要进行固溶处理，即加热到 1 050～1 150℃淬火，使碳化物分解重溶；也可进行二次稳定化处理，即加热到 850～950℃保温 4～10 h，既可以防止晶蚀，又可以消除残余应力。

奥氏体不锈钢热处理时，加热前必须清除表面油脂，以免加热时发生渗碳现象。加热的温度要均匀，在 850℃升温要缓慢，但到 850℃以上时升温要快，以免晶粒长大。

4.3 奥氏体不锈钢焊接实例

(1) 回收分离器（三类压力容器）的焊接

分离器的规格：ϕ3.4 m，板厚 32 mm，总质量 21 t。

材质：AISI321，相当于国产 0Cr18Ni9Ti 不锈钢。

焊接工艺：采用埋弧焊，主要考虑提高焊接效率，保证焊接质量。焊前不预热，层间温度不大于 60℃。为防止第一层焊穿，在背面衬焊剂垫。坡口形式与尺寸如图 4.5-10 所示。

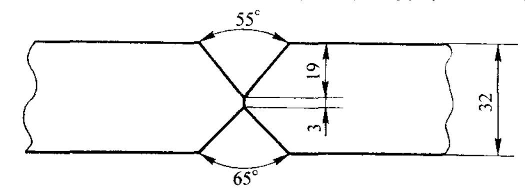


图 4.5-10　分离器焊接坡口形式与尺寸

焊接材料：焊丝为 H00Cr19Ni9，ϕ4.0 mm，焊剂为 HJ260。

焊接规范参数：焊接电流 500～600 A，电弧电压 36～38 V，焊接速度 26～33 m/h。

焊接工艺评定结果如表 4.5-44 所示。

表 4.5-44　焊接工艺评定结果

外观质量	X 射线探伤	σ_b/MPa	弯曲（180°）（正弯、背弯、侧弯）	晶间腐蚀
合格	1 级	611.5	合格	合格

(2) 稀玉米浆储罐的焊接（0Cr17Ni12Mo2）

储罐的规格：外径 ϕ500 mm，高 1 124 mm，板厚 4 mm。

材质：AISI316，相当于国产 0Cr17Ni12Mo2。

焊接工艺：采用双枪互保护钨极氩弧焊，焊接时由两名焊工同时在焊缝两侧操作，进行立焊或横焊位置的焊接，使焊接熔池正、反两面始终处于氩气保护之中，焊缝一次成形，不开坡口呈 I 形，间隙 0～1.00 mm。

立焊时，焊枪前倾 70°～75°，右手握焊枪时，向左上方向的熔池填丝；横焊时，除水平方向保持前倾 70°～85°外，不应向上倾斜 15°，注意熔池下边缘对齐，以左倾 45°方向填丝。

焊接材料：焊丝为 H0Cr19Ni12Mo，直径 ϕ10 mm；钨极直径 ϕ3 mm。

焊接规范参数：喷嘴直径为 10 mm，钨极伸出喷嘴长度为 5～7 mm，保护氩气流量为 8～11 L/min，焊接电流与焊接速度和焊接位置的对应关系如表 4.5-45 所示。

表 4.5-45　焊接电流与焊接速度的对应关系

焊接位置	焊接电流/A		焊接速度/cm·min⁻¹	焊缝尺寸/mm	
	内枪	外枪		焊缝宽度	余高
横焊	30～35	38～45	6	5～6	0～1.5
立焊	30～35	35～42	5	6～7	0～1.5

焊缝经 X 射线探伤（GB 3323—87），合格率 100%。

5　马氏体不锈钢的焊接

5.1　马氏体不锈钢焊接时的主要问题

(1) 冷裂纹问题

马氏体不锈钢焊接的主要问题之一，就是容易产生冷裂纹。淬硬组织是产生冷裂纹的重要原因，马氏体不锈钢中的含碳量越高、淬硬性越强，则冷裂倾向就越大；另外，马氏体不锈钢的导热性较差，焊接残余应力较大，如果再加上构件的厚度或接头的拘束度较大，也是形成冷裂纹的又一个重要原因；如果再有扩散氢的作用，冷裂纹就变得十分敏感了。

马氏体不锈钢具体钢种不同，对冷裂纹的敏感程度也不一样。对于低碳、超低碳马氏体不锈钢，经淬火和一次回火或二次回火热处理后，获得低碳马氏体＋逆变奥氏体复合相组织，这种组织具有较好的强韧性，冷裂纹的倾向性相对较

小；对于含奥氏体形成元素碳和镍较少、铁素体形成元素含量较多的马氏体不锈钢，其铁素体稳定性较高，淬火后除了马氏体外，还会保留部分铁素体，具有这样组织的马氏体不锈钢不能减轻冷裂纹的敏感性。

(2) 接头脆化问题

马氏体不锈钢有较大的过热倾向，也有较大的晶粒粗化倾向，当加热温度超过1 150℃时，焊接接头热影响区的晶粒将会严重长大、发生粗晶脆化现象。特别是许多马氏体不锈钢，如以1Cr13、Cr12为基的热强钢其成分特点使其组织处于马氏体-铁素体的边界上，即舍夫勒图的M-A边界，这类钢在冷却速度较小时，例如1Cr13的冷却速度小于10℃/s，近缝区就会出现粗大的铁素体和碳化物组织，因而使接头的塑韧性显著降低；当冷却速度较大时，例如大于40℃/s，由于产生粗大的马氏体组织，也会使接头的塑韧性下降。因此，焊接时控制其冷却速度很重要。

一般马氏体不锈钢大都具有回火脆性，因此，在焊接前后的热处理要引起注意。

5.2 马氏体不锈钢焊接工艺特点

(1) 马氏体不锈钢焊接方法的选择

一般常用的焊接方法，如手工电弧焊、钨极氩弧焊、熔化极气体保护焊、等离子弧焊、埋弧焊、电渣焊、电阻焊、摩擦焊、气保护药芯焊丝焊、甚至电子束焊、激光焊等，都可用于马氏体不锈钢的焊接。

电焊条手工电弧焊具有很大的灵活性，是常用的焊接工艺方法，但要选择低氢型焊条焊接马氏体不锈钢，使用前需经300~350℃ 2 h烘干，以减少扩散氢的含量，防止冷裂纹的产生。

钨极氩弧焊主要用于薄壁构件的焊接及重要构件的封底焊。采用钨极氩弧焊时，要防止焊缝背面的氧化，采取适当的保护措施。

$Ar+CO_2$ 或 $Ar+O_2$ 的富氩混合气体保护焊，不仅焊丝熔化速度快，焊接效率高，而且电弧具有微氧化性，可以防止或减少氢侵入熔池，有利于防止氢致裂纹的发生，特别是富氩混合气体保护药芯焊丝的焊接，尤为有利。

焊接工艺方法的选择要根据构件的具体情况及使用条件，综合分析考虑确定。

(2) 马氏体不锈钢焊接材料的选择

通常情况下，为保证焊缝金属与母材的力学性能及物理化学性能一致，要求焊缝的化学成分和母材的化学成分基本一致。

由于马氏体不锈钢的焊接性较差，特别是含碳量较高的马氏体不锈钢，或者拘束度较大的马氏体不锈钢接头，容易产生冷裂纹，常采用奥氏体不锈钢焊接材料，但是奥氏体焊缝和马氏体母材相比，在物理性能、化学性能、冶金性能及力学性能等方面，都存在很大的差异，在使用过程中，有时会出现破坏事故。例如，因奥氏体焊缝与马氏体母材的热膨胀系数相差悬殊，焊接残余应力较大，在有敏感性的腐蚀介质环境中，容易产生应力腐蚀破裂；或在反复加热的情况下，在熔合区产生较大的切应力，导致接头过早破坏。因此，在选用奥氏体型焊接材料焊接马氏体不锈钢时，应根据对接头的性能要求，做严格的工艺评定。

选用奥氏体不锈钢焊接材料焊接马氏体不锈钢，相当于异种钢的焊接，因此必须考虑到缝的稀释或合金化问题，以及过渡层和扩散层的问题，可以根据熔合比利用舍夫勒图来确定所需的焊接材料。

有时也可以采用镍基焊接材料焊马氏体不锈钢，使焊缝的热膨胀系数与母材接近，以降低焊接残余应力。

对于低碳或超低碳马氏体不锈钢，由于其焊接性良好，一般采用同质焊接材料。

对于以Cr12为基的多元合金化马氏体热强钢，通常不采用奥氏体不锈钢焊接材料，而采用与母材成分相似的焊接材料，并且要保证焊缝不致出现一次铁素体相，而成为均一的较微细的马氏体组织。通常用奥氏体元素C、Ni、Mn、N等来调整平衡，一旦出现块状或网状的一次铁素体，会使韧性急剧降低，也不利于蠕变极限。另外，马氏体不锈钢焊接时要严格限制焊缝中的有害杂质，如S、P、Si等，通常要求S、P≤0.015%；Si≤0.3%。

马氏体不锈钢焊接时常用的焊条及焊丝参阅表4.5-9和表4.5-14。

(3) 马氏体不锈钢焊接工艺要点

1) 关于焊前预热 通常情况下，由于马氏体不锈钢冷裂倾向较大，焊前一般都需要预热，预热温度在100~350℃，预热温度与钢中的含碳量有关，当C<0.05%时，预热温度为100~150℃；当C=0.05%~0.15%时，预热温度为200~250℃；当C>0.15%时，预热温度为300~350℃。考虑预热温度的原则是，通过焊接性试验以不产生冷裂纹的最低预热温度为准。对于马氏体不锈钢，预热温度的上限不宜超过400℃，否则有可能会产生475℃脆化，预热温度最好是在Ms点以上。整个焊接过程要保持预热状态的层间温度。

在某些情况下，例如冷裂倾向较小的低碳或超低碳马氏体不锈钢，或者刚度及接头拘束度很小，或者采用奥氏体不锈钢焊接材料焊接时，有时可以不预热。

2) 关于焊后热处理 马氏体不锈钢通常是在调质状态下供货，因此，多数情况下是在调质状态下焊接的。因此，焊后必须立即进行去应力回火处理，去应力回火的温度一般不应高于原母材调质处理时的回火温度。

焊后去应力回火处理不仅可以消除或降低焊后残余应力，促使扩散氢的逸出，防止冷裂纹的产生，而且可以使马氏体转变成回火索氏体，降低接头的硬脆性，提高接头的塑韧性。但是，去应力回火处理不能消除接头的软化现象。

去应力回火的温度一般在650~750℃之间。保温时间按2.4 min/mm确定，但不低于1 h，然后空冷。高温回火时有较多的碳化物析出，对接头的耐蚀性不利，因此对耐蚀性要求较高的焊件回火温度应该偏低些。

对于Cr13型马氏体不锈钢，采用同质焊条焊接，焊后去应力回火通常是在700~760℃之间加热空冷。

Cr13型马氏体不锈钢熔敷金属焊后热处理温度对其力学性能的影响如图4.5-11所示。从图中可以看出，从600℃开始就能使其韧性逐步恢复，在850℃左右韧性最佳，至900℃以上韧性急剧下降。

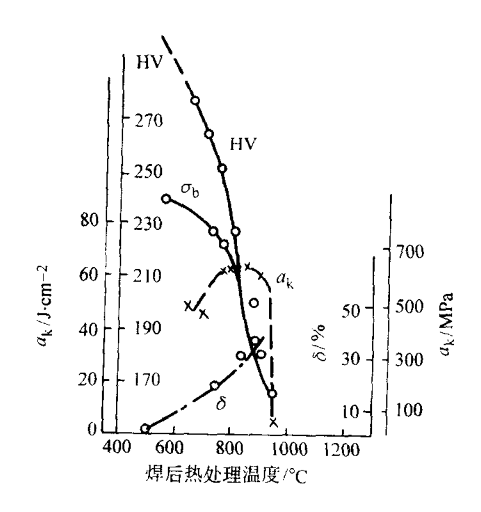


图4.5-11 Cr13熔敷金属焊后热处理对其力学性能的影响



表 4.5-46 为焊后热处理工艺对 Cr13 型马氏体不锈钢同质焊接材料焊接接头热影响区冲击韧性的影响。

表 4.5-46 焊后热处理对 Cr13 型马氏体不锈钢焊接接头热影响区冲击韧性的影响

热处理工艺与母材	距熔合线不同距离（mm）的 A_{KV}/J			
	0	1	2	3
焊态，0.1%C 的 1Cr13	25.8~29.7	21.2~28.2	16.5~19.6	16.5~18.0
焊态，0.2%C 的 2Cr13	4.7~6.2	4.7~5.5	3.1~4.7	4.7~5.5
焊后 720℃回火，0.1%C 的 1Cr13	44.7~51.0	38.4~40.0	30.5~36.9	29.7~35.3
焊后 720℃回火，0.15%C 的 2Cr13	46.2~19.3	35.3~37.6	25.1~31.4	25.9~33.0
焊后 720℃回火，0.2%C 的 2Cr13	43.1~47.8	32.1~39.2	24.3~28.2	22.7~29.0
焊后 720℃回火，0.25%C 的 2Cr13	36.9~40.0	25.1~29.0	22.7~27.4	21.2~27.4
焊后 1 050℃正火 +720℃回火，0.2%C 的 2Cr13	54.9~57.2	51.8~53.3	51.8~54.1	50.1~56.5

从表中可以看出 Cr13 型马氏体不锈钢焊后的近缝区有不同程度的脆化现象，经焊后 720℃的回火处理，其韧性基本上得到了恢复，经焊后 1 050℃正火 + 720℃回火的热处理，其韧性达到了最佳状态。

对于以 Cr12 为基添加 Ni、Mo、W、V 等多元合金的马氏体型耐热不锈钢，焊后热处理必须等到焊缝温度冷到 Ms 点以下 100~200℃，并在此温度下保持一段时间，再进行焊后热处理，例如 F11（X20CrMoWV12）钢，M_s 点为 267℃，焊后焊缝的温度要冷却到 100~150℃，并在此温度范围内保持 0.5~1.0 h，然后再进行焊后回火处理，回火温度为740~760℃，根据工件厚度保温一段时间后，以3~5℃/min的冷却速度冷至 300℃，然后空冷。这类钢在475~550℃之间有回火脆性，因此，回火温度必须在 650℃以上。

对于低碳及超低碳马氏体不锈钢，焊后的回火温度一般在 590~620℃。表 4.5-47 为焊后回火处理对 0Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢同质焊接材料焊缝力学性能的影响。

表 4.5-47 焊后热处理对 0Cr13Ni5Mo 型马氏体不锈钢焊缝力学性能的影响

焊接方法	焊接材料	热处理工艺	力学性能				
			$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%	ψ /%	A_{KV}/J
手工电弧焊	0Cr13Ni5Mo 焊条	焊态	985	1 140	3	4	26.3，29.5，8.0
		590℃×12 h	705	860	20	59	58.4，63.3，6.5
富氩气体保护焊	00Cr13Ni5Mo 焊丝	焊态	890	1 000	12	50	37.3，37.0，6.1
		590℃×12 h	660	795	19	63	81.8，88.2，99.5

对于耐蚀性能有特殊要求的焊接接头，例如用于油气输送管道的 00Cr13Ni4Mo 马氏体不锈钢，为了保证焊接接头有足够的抗应力腐蚀破裂性能，往往需要经过 670℃ + 610℃的二次回火处理，以保证焊接接头的硬度不超过 22HRC，及彻底消除焊接残余应力。

马氏体不锈钢如果是在退火状态下焊接，焊后需进行整体调质处理，调质处理的规范与母材相同。

3）马氏体不锈钢的焊接基本上与低、中合金调质结构钢的焊接相似。焊接马氏体不锈钢的线能量一般不宜过大，以防接头的粗晶脆化。

马氏体不锈钢对接平焊的手工电弧焊焊接参数见表 4.5-48。

表 4.5-48 手弧焊马氏体不锈钢对接平焊的焊接参数

板厚 /mm	坡口形式	层数	坡口尺寸			焊接电流 /A	焊接速度/cm·min^{-1}	焊条直径 /mm	备注
			间隙 b/mm	钝边 P/mm	坡口角 α/(°)				
3		2	2	—	—	80~110	10~14	3.2	反面挑焊根
		1	3	—	—	110~150	15~20	4	垫板
		2	2	—	—	90~110	14~16	3.2	—
5		2	3	—	—	80~110	12~14	3.2	反面挑焊根
		2	4	—	—	120~150	14~18	4	垫板
		2	2	2	75	90~110	14~18	3.2	—
6		4	0	2	80	90~140	16~18	3.2 4	反面挑焊根
		2	4	—	60	140~180	14~15	4 5	垫板
		3	2	2	75	90~140	14~16	3.2 4	—
9		4	0	2	80	130~140	14~16	4	反面挑焊根
		3	4	—	60	140~180	14~16	4 5	垫板
		4	2	2	75	90~140	14~16	3.2 4	—
12		5	0	4	80	140~180	12~18	4 5	反面挑焊根
		4	4	—	60	140~180	12~16	4 5	垫板
		4	2	2	75	90~140	13~16	3.2 4	—

续表 4.5-48

板厚/mm	坡口形式	层数	坡口尺寸 间隙 b/mm	钝边 P/mm	坡口角 α/(°)	焊接电流/A	焊接速度/cm·min⁻¹	焊条直径/mm	备注
16		7	0	6	80	140~180	12~18	4 5	反面挑焊根
		6	4	—	60	140~180	11~16	4 5	垫板
		7	2	2	75	90~180	11~16	3.2 4 5	—
22		7	0	2	60	140~180	13~18	4 5	反面挑焊根
		9	4	—	45	160~200	11~17	5	垫板
		10	2	2	45	90~180	11~16	3.2 4 5	—
32		14	—	2	70	160~200	14~17	5	反面挑焊根

5.3 马氏体不锈钢焊接实例

(1) 压力阀套的焊接 (3Cr13)

阀套结构：1 000 t 试管机压力阀套由两部分组成，其结构形式及尺寸如图 4.5-12 所示。

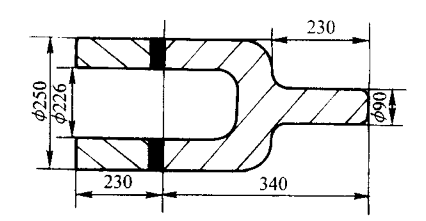


图 4.5-12 压力阀套焊接结构及尺寸

材质：3Cr13 马氏体不锈钢铸钢件。

焊接工艺：采用手工电弧焊，多层多道连续焊，不摆动，层间温度 200℃以上，焊完后立即将焊件埋入石灰堆里，使其保温缓冷。

接头为 V 形 60°坡口，间隙 1 mm，钝边 1 mm。

焊接材料：选用 E310 型 (A402) 电焊条，直径 ϕ4 mm，装配点固时用 ϕ3.2 mm E310 型焊条。

焊接规范参数：电源采用直流反极，焊接电流为 140 ~ 210 A，封底焊时，焊接电流为 160 A。焊后经 730 ~ 760℃炉中高温回火处理。

检验：经外观检查，表面着色渗透检查及 X 射线探伤，均无缺陷。

(2) 高温风机叶轮的修复 (Cr13)

叶轮尺寸：1 570 mm × 447.5 mm，底盘厚度为 10 mm，叶片厚度为 6 mm。

叶轮损坏情况：叶片断裂，叶片与底盘焊缝完全裂开。

材质：底盘为 2Cr13，叶片为 1Cr13。

焊接工艺：手工电弧焊，焊前不预热，焊后不回火。采用对称短弧焊接，提高施焊层间温度。

焊接材料：焊条 E309 (A307)，焊条直径 ϕ4.0 mm。

焊接规范参数：焊接电流 160 ~ 180 A；焊接速度 15 ~ 20 cm/min。

修复效果：焊接接头表面着色渗透检查无缺陷，运行两年多没有发现问题。

6 铁素体不锈钢焊接工艺特点

6.1 铁素体不锈钢焊接时的主要问题

(1) 接头脆化问题

铁素体不锈钢焊接时，容易引起接头的脆化，主要表现为塑韧性的降低以及脆性转变温度的提高，引起接头脆化的主要原因如下。

1) 粗晶脆化　铁素体不锈钢焊接时，在加热到 950℃以上的近缝区，晶粒容易长大，形成粗大的铁素体，而且由于铁素体不锈钢在加热和冷却过程中，不发生固态相变，因此这种粗晶现象很难通过焊后热处理来加以改善。加之高铬铁素体不锈钢本身在室温下的冲击韧性值就不高，如图 4.5-13 所示，因此在拘束度较大的情况下焊接时，很容易产生焊接裂纹。

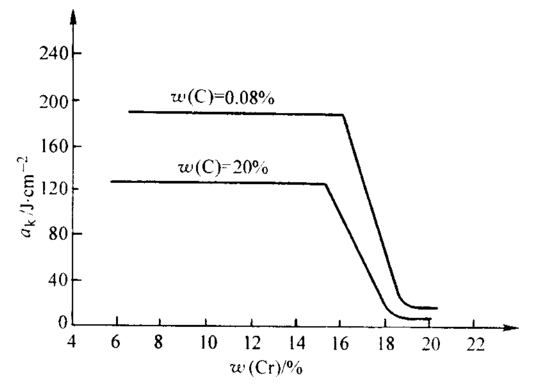


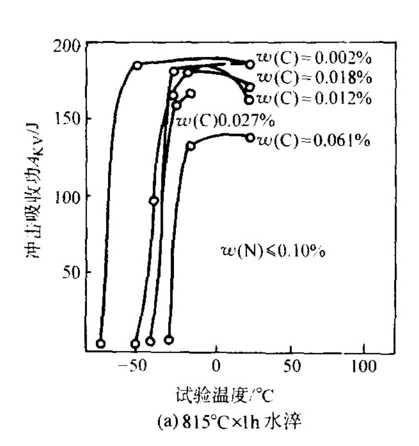
图 4.5-13 高铬铁素体不锈钢在室温下的韧性

铁素体不锈钢焊接时热影响区的脆化与母材的 C + N 的含量有关，如图 4.5-14 及图 4.5-15 所示。

从图中可以看出，在较低温度 850℃水淬状态下，铁素体不锈钢具有较低的脆性转变温度，随着 C、N 含量的提高，脆性转变温度有所提高；经较高温度 1 150℃热处理后，脆性转变温度明显提高，而且随着 C、N 含量的提高，脆性转变温度的提高也更加明显。

总体说来，高纯度高铬铁素体不锈钢焊接接头的脆化倾向要小得多。

2) 475℃脆化　475℃脆性是高铬铁素体钢的重要问题之一，在 Fe-Cr 合金系中，如图 4.5-16 所示，通过两相分离，以共析的方式时效沉淀，析出富 Cr 的体心立方结构的 α'相，并与母材之间经常保持共格关系，α'相的析出是 475℃脆化的主要原因。也有人认为，475℃脆化是由于在位错上有 α'相析出造成的。



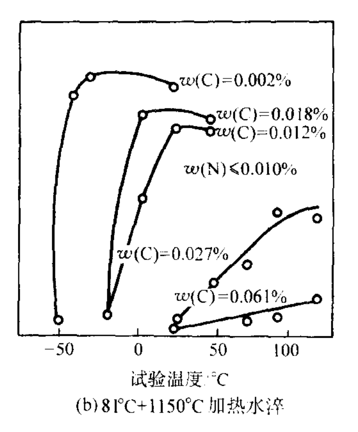
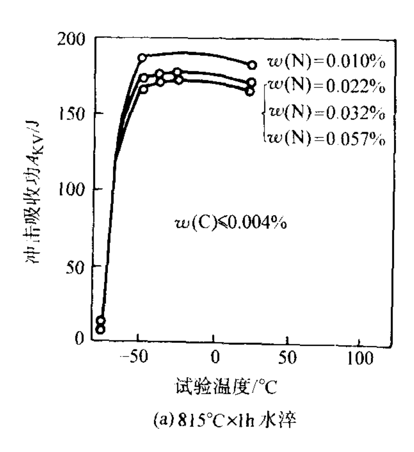


图 4.5-14　C = 0.002% ~ 0.061% 的 Cr17 铁素体不锈钢冲击试验结果



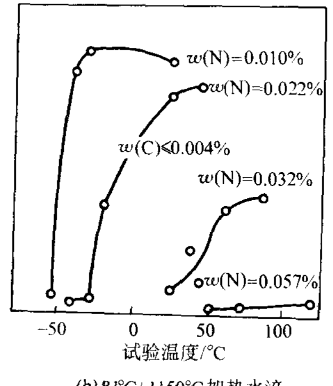


图 4.5-15　N = 0.010% ~ 0.057% 的 Cr17 铁素体不锈钢冲击试验结果

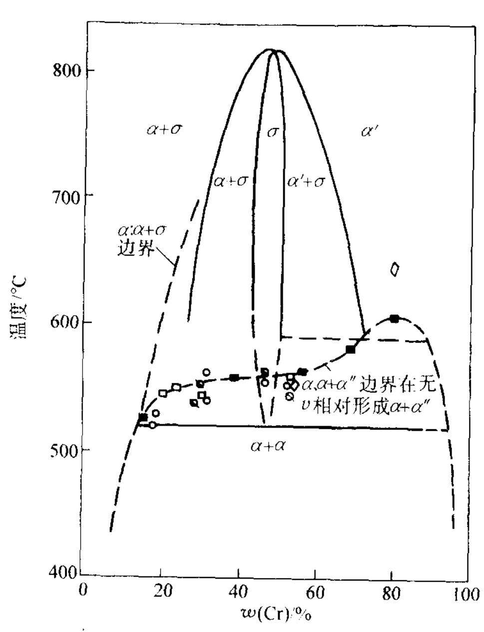


图 4.5-16　Fe-Cr 系统局部相图

杂质对 475℃脆化有促进作用。例如，在大气中冶炼的 Cr18 铁素体不锈钢比在真空中冶炼的 Cr18 钢更容易产生 475℃脆化，如果在 Cr18 钢中添加 Mo 及 Ti，475℃脆化倾向更大。因此，最大限度地提高母材及焊缝金属的纯度，尽量避免在 400 ~ 600℃温度区间加热以及尽量缩短在此温度区间的停留时间，是减少 475℃脆化的重要措施。

3）σ 相析出脆化　高铬铁素体不锈钢在 550 ~ 820℃温度区间长期加热时，将会析出 σ 相，不仅使钢脆化，还会降低钢的耐蚀性。一旦发生 σ 相析出，可以通过 850℃以上加热，使 σ 相分解重溶，即可消除 σ 相的脆化作用。

（2）接头冷裂纹问题

铁素体不锈钢焊接时有一定的冷裂倾向，主要原因如下。

1）高铬铁素体不锈钢焊接时容易产生接头脆化现象，这是产生冷裂纹的重要原因之一。

2）氢在铁素体钢的溶解度很低，但扩散速度很快（氢在奥氏体钢的扩散系数为 2.1×10^{-12} cm^2/s；而在铁素体钢中的扩散系数为 4.0×10^{-7} cm^2/s），很容易在缺陷处聚集，形成氢致裂纹。

3）高铬铁素体不锈钢的热导率比较低，焊后残余应力比较大，这是形成冷裂纹的力学条件。

（3）接头晶间腐蚀问题

高铬铁素体不锈钢也有晶间腐蚀倾向。但和 Cr-Ni 奥氏体不锈钢不同的是：Cr-Ni 奥氏体不锈钢系在敏化温度范围内重复加热后产生晶间腐蚀倾向；而高铬铁素体不锈钢在高温急冷就会产生晶间腐蚀倾向。例如 Cr17 铁素体不锈钢从 1 100 ~ 1 200℃急冷、Cr25 从 1 000 ~ 1 200℃急冷就会产生晶间腐蚀倾向。然而再经过 650 ~ 850℃加热缓冷以后，可以消除铁素体不锈钢的这种晶蚀倾向。这是因为碳在铁素体中的固溶度比在奥氏体中小得多，并且碳在铁素体中的扩散速度要比在奥氏体中大，容易在晶界处集聚沉淀，因此在高温急冷过程中就已经形成铬的碳化物使晶界贫铬，在随后的再次 650 ~ 850℃加热缓冷过程中，使 Cr 扩散均匀化，从而使贫铬区消失，实际上是进行二次稳定化处理。

在焊接热循环的作用下，由于加热和冷却速度都比较快，因此在焊缝及热影响区有可能出现晶蚀倾向。

高纯度的铁素体不锈钢的晶蚀倾向有所不同。例如，热处理对高纯度 Cr26 铁素体不锈钢腐蚀性能的影响如表 4.5-



49所示。

表 4.5-49　热处理对高纯度 Cr26 铁素体不锈钢腐蚀性能的影响

试样号	热处理规范	腐蚀率 /μm·a⁻¹	晶界上富铬碳化、氮化物的析出	有无晶蚀
1	1 100℃×30 min 水淬	22	无	无
2	1 100℃×30 min 空淬	549	大量析出	有
3	1 100℃×30 min 水淬 +900℃×15 min 水淬	36	聚集长大	无
4	1 100℃×30 min 水淬 +700℃×15 min 水淬	27	有	无
5	1 100℃×30 min 水淬 +600℃×15 min 水淬	282	有	有

从表中的试验结果可以看出，高纯度 Cr26 铁素体不锈钢［(C+N)＝0.018%］，在1 100℃水淬处理后，腐蚀率很低，晶界上无富铬碳化物及氮化物析出，无晶蚀倾向；在1 100℃空冷处理后，晶界上有碳化物及氮化物析出，腐蚀剧增，晶蚀严重；在1 100℃水淬＋900℃短时保温水淬，晶界析出物聚集长大并变得不连续，但没有晶蚀倾向；在1 100℃水淬＋600℃短时保温，晶界上有析出物，腐蚀率较大，有晶蚀倾向；如果在随后的600℃长时间保温，晶界上有析出物，但没有晶蚀倾向。由此可以看出，引起不锈钢晶蚀的关键因素是晶界是否出现贫铬。同时可以看出，对于高纯度铁素体不锈钢，水淬冷却可以有效地抑制碳、氮化合物的析出，防止晶蚀，或在产生晶蚀的敏化温度范围内长时间保温，使铬有充分扩散的时间，消除晶界贫铬现象，以达到防止晶蚀的目的。

6.2　铁素体不锈钢焊接工艺特点

(1) 铁素体不锈钢焊接方法的选择

对于普通铁素体不锈钢，常用的焊接方法有：手工电弧焊、钨极氩弧焊、熔化极气体保护焊、埋弧焊、等离子弧焊等。

对于高纯度铁素体不锈钢，常采用的焊接方法有：氩弧焊、等离子弧焊、真空电子束焊等，主要的目的是使焊接熔池能得到良好的保护，净化焊接熔池表面，免遭污染。

(2) 铁素体不锈钢焊接材料的选择

对于普通铁素体不锈钢，如果采取焊前预热和焊后热处理工艺，可以采用同质材料。例如，Cr16～18型铁素体不锈钢，可以选用E430-16 (A302)、E430-15 (A307) 焊条或H1Cr17实芯焊丝；如果不允许采取焊前预热和焊后热处理工艺，可以采用奥氏体不锈钢焊接材料，以保证焊缝具有良好的塑韧性。但是，对于热影响区的敏化问题难以消除。对于Cr25～30型铁素体不锈钢，常用的奥氏体不锈钢焊接材料有Cr25-Ni13型、Cr25-Ni20型的超低碳焊条及焊丝；对于Cr16～18型铁素体不锈钢，常用的奥氏体不锈钢焊接材料有Cr19-Ni10型、Cr18-Ni12Mo型超低碳焊条及焊丝。另外，还可以采用铬含量与母材相当的奥氏体＋铁素体双相不锈钢焊接材料，例如Cr25-Ni5-Mo3型、Cr25-Ni9-Mo4型超低碳焊条及焊丝焊接Cr25～30型铁素体不锈钢。

对于高纯度高铬铁素体不锈钢的焊接，通常选与母材化学成分相当的焊接材料。如果选择化学成分不同的焊接材料，要严格控制焊接材料中的碳、氮的含量，并适当提高铬的含量。

(3) 铁素体不锈钢焊接工艺要点

对于普通铁素体不锈钢，如果采用同质焊接材料焊接，必须注意以下几点。

1) 焊前要预热，但必须采用低温预热。由于普通铁素体不锈钢焊接时易因接头脆化产生裂纹，所以必须预热，如果预热温度过高，反而会加剧接头的粗晶脆化，因此只能采取低温预热，使接头在富有塑韧性状态下焊接。

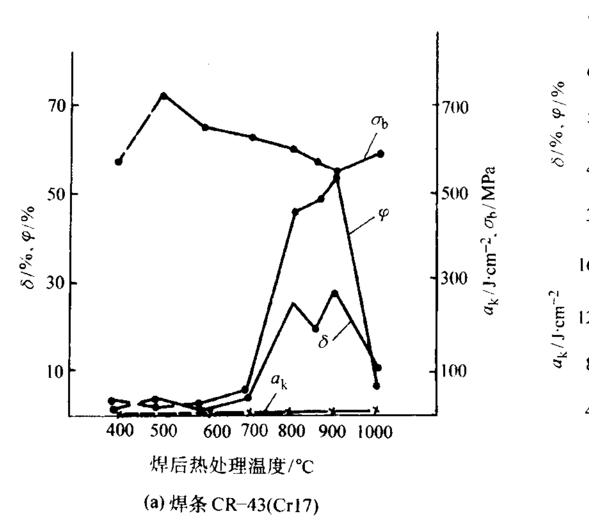
一般铁素体不锈钢采用同质材料焊接时，预热温度为100～200℃，希望不超过150℃，预热温度尽可能低些好。但是，含铬量较高时，预热温度也要适当高些，有时也不得不提高到200～300℃，这时必须限制预热温度的上限，以防止出现475℃脆化问题。

采用奥氏体不锈钢焊接普通铁素体不锈钢以及高纯度铁素体不锈钢，可以不预热。

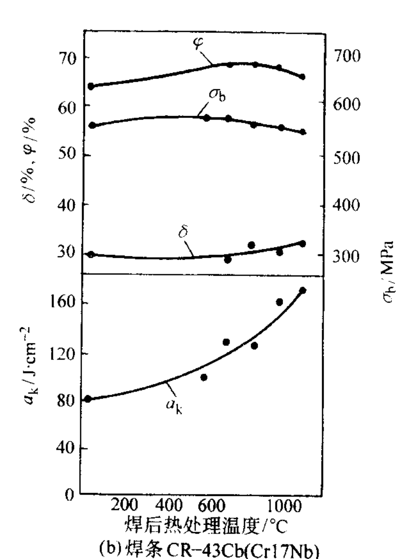
2) 关于焊后热处理问题，一般情况下，对于采用同质材料焊接的普通铁素体不锈钢，焊后需在650～850℃进行热处理，通常采用750～800℃退火处理。

焊后热处理可以使铬重新均匀化，碳、氮化合物球化，消除晶蚀倾向；可以提高接头的塑性、改善接头的力学性能，防止或延迟裂纹的产生。

例如，普通Cr17铁素体不锈钢采用同质焊条焊接，焊后热处理温度对熔敷金属力学性能的影响，如图4.5-17所示。



(a) 焊条 CR-43(Cr17)



(b) 焊条 CR-43Cb(Cr17Nb)

图 4.5-17　Cr17 熔敷金属后热处理时力学性能的变化



从图中可以看出，焊态的韧性及塑性均极低，焊后经700～800℃的热处理，塑性有较大幅度的提高，而韧性变化不大，如图4.5-17（a）所示；采用含Nb的Cr17Nb焊条焊接，焊后热处理对焊缝的韧性有改善，而对塑性影响不大，如图4.5-17（b）所示。

3）尽可能采用较小的焊接线能量，减少热输入，焊接时尽可能不横向摆动，短焊缝不宜连续施焊，多层多道焊时，要保持层间温度在150℃的预热温度范围内，还宜过高，防止过热。

对于高纯度铁素体不锈钢的焊接，应该注意以下的问题。

1）焊前可以不预热，焊后可以不作热处理。

2）施焊要加强对熔池的保护，例如可以采用双层气体保护，增大喷嘴直径，适当增加氩气的流量，填充焊丝时要防止焊丝的高温端离开保护区，同时要加强对接头高温区的保护，例如附加拖罩、增加尾气保护，这对于多层多道焊尤为重要，焊缝的背面也要通氩保护。

3）尽量采用较小的焊接线能量，减少焊接热输入，多层多道焊时，应控制层间温度在100℃以下。

4）可能的情况下，采用强迫冷却措施，如垫铜垫板，以便增加冷却速度。

7 铁素体-奥氏体双相不锈钢的焊接

7.1 双相不锈钢的特点及焊接性分析

铁素体-奥氏体双相不锈钢是指钢在常温下的组织中铁素体奥氏体各占50%左右，又称半铁素体不锈钢或半奥氏体不锈钢或双相不锈钢。它的屈服强度可达400～550 MPa，是普通不锈钢的2倍；它在比较恶劣的腐蚀环境中抗点蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀破裂、腐蚀疲劳等性能都比奥氏体不锈钢强，对晶间腐蚀不敏感。

双相不锈钢还具有良好的焊接性，它既不像铁素体不锈钢那样，晶粒容易粗化，对接头脆化比较敏感；也不像奥氏体不锈钢那样，对热裂纹比较敏感。但是，它也保留了一些铁素体不锈钢的不足之处，例如475℃脆化和 σ 相析出脆化现象。

双相不锈钢凝固时首先以单相 δ 铁素体结晶，如图4.5-18为Fe-Cr-Ni三元相图所示，当温度进一步降低时，发生 $\delta\rightarrow\gamma$ 的固态相变，冷却至室温时，将保留部分 δ 铁素体，形成 $\delta+\gamma$ 的双相组织。因此，双相不锈钢在热处理过程中，将会发生固态相变，即改变两相之间的比例。双相不锈钢在焊接时，受焊接热循环的作用，有可能成为单一的粗大铁素体组织，使接头脆化并降低抗蚀性能。因为，在焊接加热过程中，当热影响区的温度超过双相钢的固溶处理温度（1 150～1 400℃）时，晶粒将会长大，并且发生 $\gamma\rightarrow\delta$ 相变，使 γ 相减少，δ 相增加，近缝过热区有可能出现单一的粗大 δ 相组织；如果随后的冷却速度较快，将会抑制 $\delta\rightarrow\gamma$ 二次相变，使热影响区的两相组织比例失调，当 δ 铁素体含量大于70%时，二次相变的奥氏体也会变成针状或羽毛状，具有魏氏组织特征，引起接头脆化，因此控制冷却速度十分重要。

对于双相不锈钢焊缝金属，在凝固结晶过程中，由于焊接时的冷却速度较快，在随后的降温过程中，$\delta\rightarrow\gamma$ 的固态相变受到抑制，因此，即使焊缝金属的化学成分与母材相同，但焊缝金属中的 δ 相比母材要高得多。为了保证焊缝金属有足够的 γ 相，需要提高焊缝金属的Ni当量，通常的方法是提高焊缝金属奥氏体化元素Ni、N的含量。

另外，从双相不锈钢的等温转变TTT图（如图4.5-19所示）及连续冷却转变CCT图（如图4.5-20所示），可以看出，双相不锈钢在600～1 000℃温度范围内较长时间加热并缓冷时，有 x 相、σ 相以及碳化物（$Cr_{23}C_6$）、氮化物（Cr_2N、CrN）及其他金属间化合物析出，而且，当Cr、Mo含量较高或双相不锈钢中含有Cu、W时，上述转变和析出更加敏感。这些脆性相的形成和化合物的析出，使双相不锈钢焊接接头塑韧性及抗蚀性能大幅度降低。

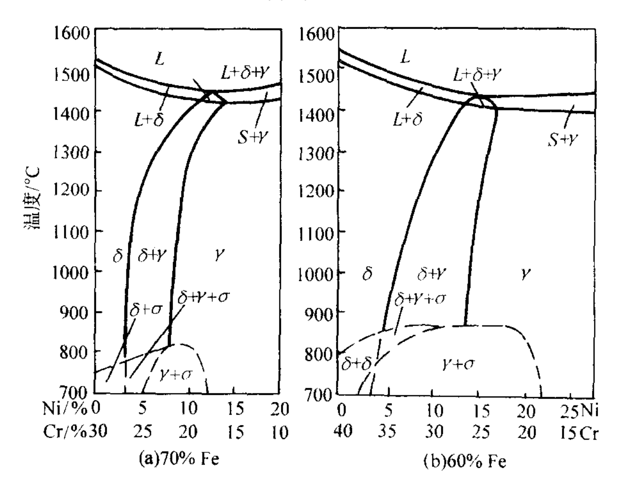


图4.5-18 Fe-Cr-Ni三元相图

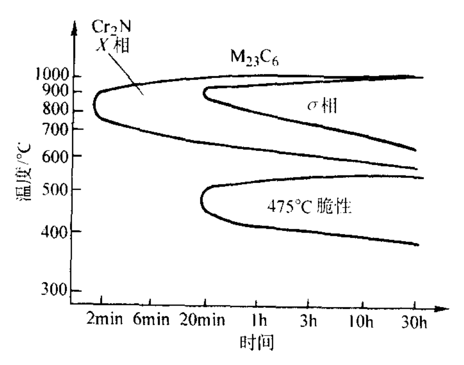


图4.5-19 双相钢TTT图

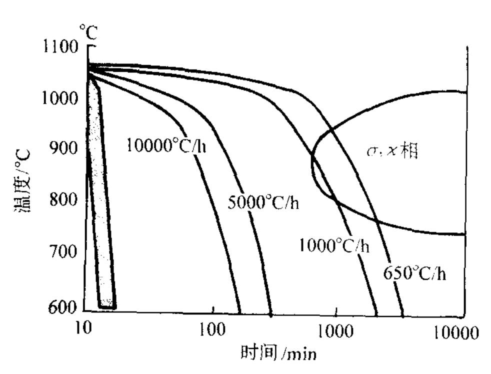


图4.5-20 双相钢CCT图

此外，在焊接热循环作用下，双相不锈钢焊接接头区的两相失调，δ 相远多于 γ 相。由于C-N在铁素体中的固溶度很低（C<0.02%，N<0.05%），而在奥氏体中固溶度较高（C≈2.16%，N≈0.2%～0.5%），因此 γ 相的减少将促使碳化物、氮化物及 σ 相等的析出；同时，δ 相的增加，在350～550℃加热时，475℃脆化倾向也随之增大。

虽然，双相不锈钢具有良好的焊接性，但上述问题在制定焊接工艺时，必须引起足够的重视。

目前国际上普遍采用的双相不锈钢有：Cr18型、Cr23（不含Mo）型、Cr22型、Cr25型四类。我国生产的只有Cr18型和Cr25型两类。



7.2 Cr18型双相不锈钢的焊接要点

(1) Cr18型双相不锈钢的焊接性

Cr18型双相不锈钢列入我国国家标准的牌号有00Cr18Ni5Mo3Si2和1Cr18Ni11Si4AlTi两种。

00Cr18Ni5Mo3Si2属于超低碳双相不锈钢，具有良好的焊接性，两相组织的比例相对比较稳定，焊接冷裂纹及热裂纹的敏感性都比较小，接头的脆化倾向也较小。

而1Cr18Ni11Si4AlTi双相不锈钢的焊接性要稍差些。特别是σ相析出脆化及475℃脆化倾向要稍大一些。

(2) Cr18型双相不锈钢焊接工艺要点

1) Cr18型双相不锈钢焊接常用的焊接方法有：手工电弧焊、钨极氩弧焊、熔化极气体保护焊、埋弧焊等。对于薄板、薄壁管及管道的封底焊，一般选用钨极氩弧焊，对于中厚板以及管道封底焊以后的焊接，可选用手工电弧焊，熔化极气体保护焊以及埋弧焊，对于需要全位置焊接的构件，最好采用富氩混合气体保护药芯焊丝焊接。

2) 焊接Cr18型双相不锈钢的焊接材料一般选用组织、力学性能和耐蚀性能与母材相匹配的Cr22-Ni9-Mo3型超低碳双相不锈钢焊接材料。例如E2209焊条（AWS标准）、E2293焊条(EN欧洲标准)。国产焊条牌号有A321、A022Si焊条；以及Er2209焊丝（AWS标准）；作为填充焊丝，可以用母材金属，也可以选用H00Cr19Ni12Mo2及H00Cr20Ni14Mo3两种焊丝。

3) 一般情况下，Cr18型双相不锈钢焊接时，焊前不预热，焊后不作热处理。

4) Cr18型双相不锈钢焊接时应尽可能采用较小的焊接线能量，即采用较小的焊接电流和较大的焊接速度，以减少热输入。

5) 在多层多道焊时，层间温度不得高于100℃，施焊过程中，焊丝或焊条不要横向摆动。

6) 和奥氏体不锈钢不同的是，接触腐蚀介质的一面要先焊。如果接触腐蚀介质的一面只能最后施焊，这时最好加焊一道工艺焊缝，然后再将这道工艺焊缝加工掉。

7.3 Cr25型双相不锈钢焊接工艺要点

(1) Cr25型双相不锈钢焊接性

Cr25型双相不锈钢列入我国国家标准的牌号只有0Cr26Ni5Mo2一种，这种钢抗点蚀和缝隙腐蚀能力特别强。

Cr25型不锈钢同其他双相不锈钢一样，具有良好的焊接性，但是，由于合金元素的含量较高，且有Mo的加入，因而具有比较明显的475℃脆性；在600～1 000℃温度范围内加热时，焊接热影响区及多层多道焊的焊缝金属中，容易析出σ相、x相以及碳、氮化合物（$Cr_{23}C_6$、Cr_2N、CrN）和其他各种金属间化合物。另外，当冷却速度过快时，将使$\delta \to \gamma$的固态相变受到抑制，使两相组织比例失调。因此，合理地制定焊接工艺十分重要。

(2) Cr25型双相不锈钢焊接工艺要点

1) 由于Cr25型双相不锈钢属于高合金钢、含Cr量较高，在选用焊接方法时，要求保护性能好，常用的焊接方法有：手工电弧焊、钨极氩弧焊、熔化极气体保护焊、埋弧焊（与合适的碱性焊剂相匹配）等。

2) 焊接Cr25型双相不锈钢时，焊接材料一般选用与母材金属成分相同或镍基的焊条或焊丝，常用的有Cr25-Ni9-Mo4型和Cr25-Ni5-Mo3型两种，通常优选前者类型的焊条或焊丝，国外有：E2533低碳焊条（AWS）、E2572焊条（EN）、E2593CuL超低碳焊条（EN）、ER2533超低碳焊丝（AWS）。国产的有E310型超低碳焊条或不含Nb的高Mo型镍基焊接材料，所选用的焊条应该是低氢型的。

3) Cr25双向不锈钢焊接时，焊接线能量的选择宜适当偏小，但也不宜过小，一般控制在10～15 kJ/cm范围内，层间温度不高于150℃，基本原则是中薄板焊接时采用中小热输入，中厚板焊接时采用较大热输入。

4) 一般情况下，Cr25双相不锈钢焊接时，焊前不需要预热，焊后不作热处理，但有些焊接结构件是在较强的腐蚀性介质工况条件下服役的，焊后需对接头进行1 050～1 080℃的固溶处理。

7.4 双相不锈钢焊接实例

(1) 管道焊接（SAF2205）

管道尺寸：ϕ158 mm×13 mm。

坡口形式及尺寸：60°单V形坡口，钝边2 mm，根部间隙2 mm。

焊接材料：2205双相不锈钢管与焊接材料的化学成分如表4.5-50所示。

表4.5-50 2205双相钢管与焊接材料的化学成分（质量分数） %

材 料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
SAF2205钢管	0.018	0.38	1.62	0.011	0.006	22.04	5.57	3.01	0.13
TIG焊丝	0.018	0.49	1.68	0.018	0.003	22.57	8.04	2.99	0.15
手弧焊电焊条	0.025	1.0	0.8	—	—	22.0	9.0	3.0	0.10

焊接方法：采用TIG焊封底，焊丝直径ϕ2.0 mm，手弧焊填满，焊条直径ϕ3.2 mm。

焊接工艺参数及线能量如表4.5-51所示。

表4.5-51 2205双相钢管焊接工艺参数

焊接参数	封底焊道	第一层焊道	第二层焊道	第三层焊道	盖面焊道
焊接电流/A	190	105	105	105	105
焊接线能量/kJ/cm	13	8	12	12	14

焊接接头的综合性能如表4.5-52所示。

(2) 00Cr18Ni5Mo3Si2在炼油厂的应用

在炼油厂，由于原油中含有无机盐如NaCl、$CaCl_2$、$MgCl_2$等和硫化物如H_2S、RSH、RSR等，在炼油过程中的水解和热解作用产生了大量的H_2S和HCl等强腐蚀性质。用00Cr18Ni5Mo3Si2双相不锈钢代替0Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢，抗蚀性能有了很大改善，特别是抗点蚀及应力腐蚀破裂有了明显的提高。

表4.5-52 2205双相钢焊接接头综合性能

部位	σ_b/MPa	面弯	A_{KV}/J	HV	晶蚀	点蚀
母材	760，770	合格	—	238～257	合格	无
焊接接头	804，805	合格	0℃:53,57,63 -20℃:48,51,55	220～276(面层) 272～284(根部)	合格	无

通过挂片试验，测得的00Cr18Ni5Mo3Si2、0Cr18Ni9Ti及碳钢的腐蚀速率如表4.5-53所示。



表 4.5-53　00Cr18Ni5Mo3Si2、0Cr18Ni9Ti 及碳钢的腐蚀速率比较

挂片部位	温度/℃	腐蚀速度/10^{-5}m·a^{-1}		
		00Cr18Ni5Mo3Si2	0Cr18Ni9Ti	碳钢
常压塔顶	120	2.550～2.750	4.140	5.640
常压塔顶空冷器入口	90	0.162～0.479		18.500
常压塔顶空冷器出口	60	0.146～0.215		18.600
常压塔顶回流罐	40	0.050～0.080	3.510	16.760
催化吸收解吸塔底	40	0.030	0.050～0.110	7.00
催化裂化吸收解吸塔顶	110	0.010～0.040	0.020～0.050	11.300
催化裂化稳定塔底	68	0.040～0.060	0.160～0.410	7.00
催化裂化稳定塔底	190	0.070～0.200	0.210～0.270	9.960
延迟焦化分馏塔顶部	200	0.040		14.300

在炼油设备中的减压塔顶挥线衬里，壁厚 2 mm；水冷器的水冷换热面、197 板 ϕ25 mm×2.5 mm×6 000 mm 的钢管；空冷器的换热面，由 ϕ25 mm×2.5 mm×4 500 mm 管排等全部采用 00Cr18Ni5Mo3Si2 双相不锈钢焊接结构，全部采用手工电弧焊、A302 焊条焊接，效果良好。

8　时效不锈钢的焊接

8.1　时效不锈钢的类型

时效不锈钢又称析出硬化不锈钢或沉淀硬化不锈钢，按其组织可以分为时效马氏体不锈钢、时效半奥氏体不锈钢及时效奥氏体不锈钢三种类型。列入我国国家标准的只有时效半奥氏体不锈钢 0Cr17ni7Al 一种牌号。

时效不锈钢经过时效处理后具有较高的强度、塑韧性及耐蚀性，在航空航天及核工业中获得广泛的应用，是制造高强度、耐腐蚀零部件的主要材料，如各种传动轴、叶轮、泵等。

8.2　时效半奥氏体不锈钢焊接要点

（1）时效半奥氏体不锈钢的化学成分及力学性能如表 4.5-54 及表 4.5-55 所示。

表 4.5-54　时效半奥氏体不锈钢化学成分（质量分数）　%

钢　种	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Al	N
0Cr17Ni7Al（中国）	0.09（0.08）	1.00（0.50）	1.00（0.50）	16.00～18.00（17.0）	6.50～7.75（7.0）	—	0.75～1.5（1.1）	—
17-7PH（美国）	0.09（0.07）	1.00（0.60）	1.00（0.40）	16.00～18.00（17.0）	6.50～7.75（7.0）	—	0.75～1.5（1.2）	—
PH15-7Mo（美国）	0.09（0.07）	1.00（0.60）	1.00（0.40）	14.00～16.00（15.0）	6.50～7.75（7.0）	2.0～3.0（2.2）	0.75～1.5（1.2）	—
PH14-8Mo（美国）	0.02～0.05（0.04）	1.00（0.02）	1.00（0.02）	13.50～15.50（15.1）	7.5～9.5（8.2）	2.0～3.0（2.2）	0.75～1.5（1.2）	—
AM-350（美国）	0.10（0.10）	0.80（0.80）	0.50（0.25）	17.0～18.0（16.5）	3.5～4.5（4.3）	2.5～3.0（2.75）	—	（0.10）
AM355（美国）	0.10～0.15（0.13）	0.50～1.25（0.95）	0.50（0.25）	15.0～16.0（15.5）	4.0～5.0（4.3）	2.5～3.25（2.75）	—	0.07～0.13（0.12）
FV520	0.07	2.00	1.00	14.0～18.0	4.0～7.0	1.0～3.0	Ti＝0.5，Cu＝1.0～3.0	

注：表中的单值为最大值，括号内为名义值。

表 4.5-55　典型时效半奥氏体不锈钢的常温力学性能

钢　种	热处理工艺	形状	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	HRC
17-7PH	TH-1050	薄板或带材	1 276	1 379	9	43
17-7PH	RH-950		1 440	1 548	6	47
PH15-7Mo	RH-950		1 551	1 655	6	48
PH15-7Mo	CH-950		1 793	1 827	2	49
PH14-8Mo	SRH-950		1 482	1 586	6	48
AM-350	SCT-850		1 207	1 420	12	46
AM-355	SCT-850		1 248	1 510	13	48
FV520	ATH-1050		1 078	1 264	10	41

注：TH-1050—相变处理＋时效硬化处理（566℃）；
RH-950—冷处理＋时效硬化处理（510℃）；
CH-905—冷加工＋析出硬化处理（428℃）；
SRH-950—固溶＋深冷＋时效硬化处理（510℃）；
SCT-850—深冷＋回火（454℃）；
ATH-1050—固溶＋相变处理＋时效硬化处理（450℃）。

（2）时效半奥氏体不锈钢焊接性

时效半奥氏体不锈钢，通常具有良好的焊接性，一般在退火状态下进行焊接，由于该钢材以奥氏体为主，因此具有奥氏体组织的良好韧性，其焊接性与奥氏体不锈钢相似，不会产生冷裂纹，即使这种钢经过相变后转变为马氏体组织再进行焊接，也不会出现冷裂纹，因为它所形成的是低碳马氏体，硬度不高且塑性较好，同时对热裂纹也不敏感。但是，在焊接热循环的作用下，有可能出现如下一些问题。

1）由于焊缝及近缝区的加热温度远高于固溶温度，铁素体相比例有所增加，铁素体含量过高可以引起接头的塑韧性降低。

2）在焊接高温区，碳化物，特别是铬的碳化物将分解重溶，固溶于奥氏体，从而提高了固溶体中的有效合金含量，增加了奥氏体的稳定性，降低了焊缝及近缝区的 Ms 点，使奥氏体在低温下也难以转变成马氏体，使焊接接头的强度与母材不相匹配。

3）有一次火口裂纹倾向。

4）对缺口的敏感性较大。

5）如果采用奥氏体型焊接材料焊接时有一定的热裂纹倾向。

（3）时效半奥氏体不锈钢焊接工艺要点

1）焊接方法　常用的焊接方法有手工电弧焊、钨极氩弧焊、惰性气体保护焊等。



2）焊接材料　通常选择同质材料作为填充金属，但是，目前尚没有相应的焊条和焊丝。可以在母材上截取焊丝，作为钨极氩弧焊的焊接材料。

在某些情况下，也可以选用与母材成分不同的奥氏体型焊接材料，如E308、E308L、E309、E310、E316等型号电焊条，以及H0Cr21Ni10、H0Cr19Ni12Mo2、H1Cr24Ni13、H1Cr26Ni21等牌号的焊丝。选用Cr18Ni9、Cr18Ni12Mo2型焊接材料，焊缝没有热裂倾向。

3）焊接热处理　通常情况下，焊前不预热。

在采用同质材料施焊时，为了克服焊接接头力学性能的不均匀性，焊后需进行必要的热处理，其中包括以下几种。

焊后调整热处理　加热到746℃保温3 h后空冷，促使铬的碳化物析出，使固溶有效合金元素下降，提高M_s点温度，促使马氏体转变。

低温退火　加热到930℃保温1 h后水冷，促使铬的碳化物$Cr_{23}C_6$从固溶体中析出，降低有效固溶合金元素的含量，可以提高马氏体开始转变M_s点至约155～166℃。

水冷热处理　在低温退火处理后立即进行水冷处理，使其在-73℃保持3 h以上，使奥氏体几乎全部转变为马氏体，然后自然升温至室温。

时效硬化处理：时效硬化处理的温度和时间对焊接接头的组织和性能影响较大。当回火时间相同时，回火温度从350℃增加到600℃时，接头中的残余奥氏体减少，回火马氏体增加，析出碳化物增多，组织变得细小球化；同样，在回火温度不变的情况下，回火时间短，接头中残余奥氏体增多，马氏体回火不充分，析出碳化物少，对接头性能不利；相反，回火时间长，残余奥氏体减少，析出碳化物增多，马氏体逐渐球化，细小密布，接头强化效果显著。

整体复合热处理工艺较为复杂，但能使接头达到与母材等强度的目的。

在选用奥氏体型焊接材料焊接时，焊前不需要预热，焊后也不需热处理。

（4）时效半奥氏体不锈钢焊接实例

1）储氦容器的焊接　储氦容器结构为两个半球体的高压容器，如图4.5-21所示，外径ϕ890 mm，壁厚19 mm。

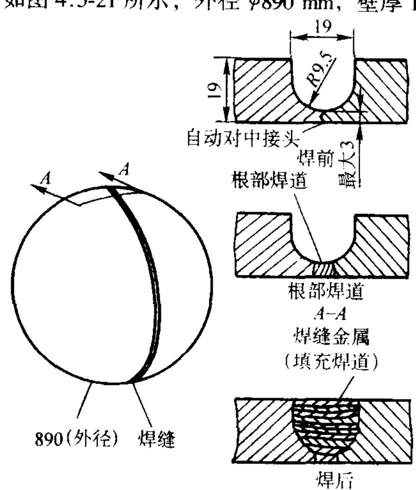


图4.5-21　储氦容器焊接示意图

材料：17-7PH钢，相当于我国的0Cr17Ni7Al时效半奥氏体不锈钢。

焊接方法：采用自动钨极气体保护焊。

焊接材料：ϕ1.1 mm PH13-8Mo焊丝。

焊接工艺：接头坡口形式及尺寸如图4.5-21所示，施焊在滚轮支架上进行，球体内部通流动氩气保护，根部焊缝采用自熔不加填充焊丝，机头不摆动，以后加填充丝共焊10层。

2）时效半奥氏体不锈钢容器的焊接

容器结构尺寸：ϕ330 mm×800 mm，壁厚1.5 mm。

材料：0Cr17Ni7Al

焊接方法：脉冲钨极自动氩弧焊（WZE-300型自动钨极氩弧焊机）。

焊接材料：填充焊丝为0Cr17Ni7Al，化学成分为：C＝0.01%，Mn＝0.76%，Si＝0.32%，Ni＝7.75%，Cr＝16.4%，Al＝0.64%。

焊接参数：焊枪喷嘴直径ϕ14 mm，钨极直径为ϕ4 mm，钨极顶端磨成30°，钨极与待焊工件表面距离为2.5～3.0 mm，焊丝直径为ϕ1.6 mm，$I_{脉冲}$＝120A，$I_{维弧}$＝28 A，$f_{脉冲}$＝5，K＝40%，电弧区氩气流量为14 L/min，焊缝背面氩气保护流量为3～4 L/min，焊接速度为21.4 cm/min，送丝速度为焊机刻度0.4。

焊前对工件焊口处及焊丝要仔细清理油污。

焊后100%X射线探伤无缺陷，焊接接头的抗拉强度为母材的98%，冷弯角为70°～80°。

8.3　时效马氏体不锈钢焊接要点

（1）时效马氏体不锈钢化学成分及力学性能

这类不锈钢在高温下为奥氏体组织，但是，它的M_s点较高，M_f点也在室温以上，所以经过固溶处理后，几乎可以获得全部马氏体组织。同时由于含有在马氏体中固溶度很小的Cu、Al、Mo、Ti、Nb等强化元素，因此在低温回火后，可以达到时效强化的效果。典型的时效马氏体不锈钢的化学成分及力学性能如表4.5-56及表4.5-57所示。

表4.5-56　典型时效马氏体钢化学成分(质量分数)%

钢种	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Ti	Nb＋Ta
17-4PH	0.07	1.00	1.00	15.5～17.5	3.0～4.0	3.0～4.0	—	0.15～0.45
15-5PH	0.07	1.00	1.00	14.0～15.5	3.5～5.5	2.5～4.5	—	0.15～0.45
13-8Mo	0.05	0.10	0.10	12.25～13.25	7.5～8.5	—	Al＜0.90～1.35	Mo＝2.0～2.5
AM362	0.05	0.50	0.30	14.0～15.0	6.0～7.0	—	0.55～0.90	—
AM363	0.05	0.30	0.15	11.0～12.0	4.0～5.0	—	0.30～0.60	—
Custom455	—	—	—	12	9	2	1	—

表4.5-57　典型时效马氏体钢的力学性能

钢种	热处理工艺	材料形状	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%	硬度 HRC
17-4PH	H-900	板材或带材	1 171	1 308	5	40～48
17-4PH	H-1250		998	1 067	5	35～43
15-5PH	AH-900		1 096	1 309	10	HB：388～488
13-8Mo	SRH	棒材或锻件	1 372	1 548	11～18	—
AM362	AH-900	薄板	1 205	1 240	10	—
AM363	AH-900		812	853	11.5	—

注：H表示时效硬化处理；
AH表示固溶＋时效硬化处理；
SRH表示固溶＋深冷＋时效硬化处理。

(2) 时效马氏体不锈钢焊接性

时效马氏体不锈钢具有良好的焊接性，一般情况下不会产生焊接裂纹，焊接接头中出现的马氏体属于低碳马氏体，对冷裂纹也不敏感。但需要注意的是母材强化元素的偏析会引起热影响区塑韧性降低。

(3) 时效马氏体不锈钢焊接工艺要点

时效马氏体不锈钢的焊接多数情况下采用同质焊接材料进行等强度焊接，在拘束度不大的情况下，一般不需要焊前预热及焊后热处理，必要时，焊后可以采用与母材相同的低温回火时效处理，以便获得与母材等强度的焊接接头。

对于不要求与母材等强度的焊接接头，也可采用奥氏体型焊接材料焊接，焊前不预热，焊后不作热处理。

8.4　时效奥氏体不锈钢焊接要点

(1) 时效奥氏体不锈钢化学成分及力学性能

时效奥氏体不锈钢化学成分的特点是铬镍的含量较高，固溶后的奥氏体极为稳定，M_s 点在常温以下，即使经受冷加工后也保持奥氏体组织不变，它的时效强化是通过在钢中加入一些低温下固溶度较小的合金元素，使其在奥氏体中呈过饱和状态，在时效过程中析出强化相，达到强化的目的。

表 4.5-58 及表 4.5-59 列出了 A-286 及 17-10P 两种典型的时效奥氏体不锈钢的化学成分和力学性能。其中：17-10P 钢的强化元素为 C 和 P，与其他时效强化不锈钢不同；A-286 钢经深度冷变形后，在液氢温度下仍具有良好的塑韧性。

表 4.5-58　典型时效奥氏体钢化学成分（质量分数）　%

钢　种	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo	Al	V	Ti
A-286	0.05	1.45	0.50	14.75	25.25	0.030	0.020	1.30	0.15	0.30	2.15
17-10P	0.10	0.60	0.50	17.0	11.0	0.30	≤0.01	—	—	—	—

表 4.5-59　A-286 钢的低温拉伸性能（冷变形 53%后时效）

试验温度/℃	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%	ψ/%
24	1 333	1 435	14.0	42.3
−73	1 464	1 532	14.0	41.3
−129	1 510	1 590	18.3	41.8
−196	1 582	1 781	21.0	41.4
−253	1 708	1 968	23.3	39.9

(2) 时效奥氏体不锈钢焊接性

由于 A-286 时效奥氏体不锈钢与 17-10P 时效奥氏体不锈钢的合金体系与强化元素存在较大的差异，因此两种时效不锈钢的焊接性也有很大差别。对于 A-286 时效不锈钢，虽然含有较多的时效强化元素，但其焊接性与时效半奥氏体不锈钢的焊接性相当，对焊接裂纹的敏感较小；而 17-10P 时效不锈钢，尽管严格控制了 S 的含量，但 P 的含量高达 0.30%，高温时磷化物很容易在晶界处析出聚集，因此容易产生近缝区的液化裂纹及引起热影响区的脆化。

(3) 时效奥氏体不锈钢焊接工艺要点

由于 A-286 与 17-10P 两种时效奥氏体不锈钢的焊接性差异较大，因此，它们的焊接工艺差异也较大。

对于 A-286 时效奥氏体不锈钢，其焊接性良好，和时效半奥氏体不锈钢差不多，可以参照时效半奥氏体不锈钢的焊接工艺施焊，通常情况下，焊前不需要预热，焊后按母材时效处理工艺进行焊后热处理，即可获得接近于与母材等强的焊接接头。

对于 17-10P 时效奥氏体不锈钢，由于其焊接性较差，一般熔焊方法难以获得完好接头，可以选择特种焊工艺，如摩擦焊等。

编写：蒋　锦（西安交通大学）
潘希德（西安交通大学）



第6章　高温合金的焊接

1　概述

1.1　高温合金的发展及应用概况

高温合金又称热强合金、耐热合金或超合金，是20世纪40年代发展起来的一种新型航空金属材料；它可在600～1 100℃的氧化和燃气腐蚀条件下，承受复杂应力，能长期可靠地工作。主要用于航空发动机的热端部件，也是航天、能源、交通运输和化学工业的重要材料。

变形高温合金的研制起点大约是1938年从英国开始的，基本材料是当时的电热丝材料80Ni－20Cr合金以及抗氧化材料Ni－Cr－Fe合金，在此基础上加入Al、Ti发展出了著名的Nimonic系列合金。美国和苏联也研制了类似的Inconel X和ЭИ437Б合金。

铸造高温合金的发展始于20世纪40年代。铸造高温合金是由合金锭重熔后直接浇注成零件的高温合金。铸造高温合金按凝固工艺，可分为普通铸造（等轴晶）合金、定向凝固柱晶合金和定向凝固单晶合金。1943年美国首次在涡轮喷气发动机J－33上选用了铸造钴基高温合金HS－21制造涡轮工作叶片，并与原采用的变形合金Hastelloy－B的叶片进行比较试车，获得成功。随着航空发动机的发展，对高温合金性能提出了越来越高的要求，为了提高变形高温合金的强度和工作温度，在合金过程中相继加入了多种合金元素，这又引出了变形加工困难的问题。为此人们越来越重视铸造高温合金的研究与发展。从20世纪50年代末开始，陆续出现了许多高性能的铸造高温合金，如N－100、ЖС6К、B1900、MAR－M200等。在铸造高温合金发展过程中，熔炼及凝固工艺技术的发展起着极其重要的作用。其中在20世纪50年代末出现的真空熔炼技术和60年代初出现的定向凝固技术使铸造高温合金的研究开发取得突破性进展。定向凝固高温合金由于消除了垂直于应力轴的横向晶界而使其承温能力比普通铸造等轴晶合金提高约50℃。20世纪70年代，美国已将定向凝固涡轮叶片、导向叶片广泛投入航线使用。定向凝固合金的进一步发展是出现了完全消除了晶界的单晶高温合金。单晶合金是目前性能水平最高的铸造高温合金，从F100－PW－220发动机用PWA1480第一代单晶合金到EJ200和F119采用的RR3000和CMSX－10（或Rene’N6）第三代单晶合金，使涡轮进口温度提高了近80℃。第一代单晶合金以PWA1480、CMSX－2为代表，其工作温度达1 040℃左右。在20世纪70年代末就开始用于高涵道比涡扇发动机，如JT9D7R4系列、PW2000系列等发动机。20世纪80年代以来相继出现第二代（如PWA1484、PWA1487、CMSX－4、ЖС36、Rene’N5等）、第三代（如PWA1496、CMSX－10等）和第四代（如RR3010等）单晶合金，每一代单晶合金承温能力的提高幅度约为30℃。因此，20世纪70年代以来铸造高温合金一直占据着航空发动机中温度最高、应力最复杂或者说工作条件最恶劣的位置。从20世纪50年代到90年代，标志合金性能水平的140 MPa/100 h的承温能力从750℃左右提高到1 150℃左右。当前，高性能的单晶合金与先进的冷却技术和优异的防护及隔热涂层相结合，使推重比为10的航空发动机的涡轮前温度高达2 000 K。

我国高温合金是从1956年试制GH3030合金开始的。其发展的历程与国际接轨，即遵从变形合金、铸造合金和定向凝固及单晶合金的发展道路，使我国成为继美、俄、英之后第四个在世界上形成独立高温合金体系的国家。从20世纪60年代以来相继研制了一些达到当时国际水平的变形高温合金，例如叶片用合金有GH151、GH118、GH4220等；涡轮盘用合金有GH2036、GH2132、GH2135、GH901、GH4033、GH4133、GH4698、GH738、GH710等；燃烧室用合金有GH1140、GH1015、GH1016、GH3128、GH170、GH2018、GH2302、GH4099等。近年来，为适应高推重比发动机的需要，研制成功了一些高水平的变形高温合金，如GH4169、GH742、GH159以及低膨胀高温合金GH907等。

我国从1958年开始研制第一个铸造高温合金K401，作为WP6发动机导向叶片材料。迄今已研制了铁－镍基、镍基、钴基和Ni_3Al基合金50多个牌号，用于航空发动机和其他工业部门，形成了我国的铸造高温合金系列。例如K417合金是我国第一个用于航空发动机涡轮工作叶片的铸造合金，已用于航空发动机涡轮转子叶片的成批生产，还用作涡轮增压器转子叶轮及火药起动机整体涡轮等，是目前应用最多、产量最大的铸造高温合金之一。DZ4是我国第一个用于现役航空发动机的定向凝固高温合金，已投入大批量生产。DD3和DD402合金是我国第一批用于航空发动机的单晶合金，其性能水平相当于美国第一代单晶合金PWA1480、CMSX-2等。IC6合金是Ni_3Al基定向凝固铸造合金，是国内外首例用在航空发动机的金属间化合物基铸造合金，具有高温比强度高、初熔温度高、密度较低和成本较低的特点，已制成涡轮导向叶片，通过试车、试飞试验，投入批量生产。近年来研制的DD6单晶合金，其性能水平与国外第二代单晶合金相当，但其所含昂贵的元素Re量比国外同类合金低，成本显著低于国外同类合金，是我国目前性能水平最高的铸造高温合金。

1.2　高温合金的强化方法及合金元素的作用

高温合金按基体可分为镍基、铁基和钴基三类，其中以镍基合金的发展最快，使用也最广；其次是铁基合金，铁基合金是在铁－镍－铬基体上添加合金化元素发展起来的，虽然在高温抗氧化性和组织稳定性方面，比同类镍基合金稍差，但在适当的温度范围内，具有良好的综合性能，因此在航空发动机上被广泛用于燃烧室、涡轮盘、机匣和轴类等零件；钴基合金虽具有良好的综合性能，但由于资源缺乏，发展受到限制。

高温合金按强化方法可分为固溶强化、沉淀强化和弥散强化型三类。固溶强化是通过钴、铬、钨、钼、铌、钽等元素，提高原子间结合力，产生点阵畸变，降低堆垛层错能，产生短程有序及其他原子偏聚，阻止位错运动，降低固溶体中元素扩散系数，提高再结晶温度来强化合金基体，因此是高温合金的基本强化手段。

沉淀强化（也称时效强化）是通过添加铝、钛、铌、钽、铪等元素，形成共格稳定的金属间化合物$\gamma'-Ni_3(Al,Ti)$和$\gamma''-Ni_3(Nb,Al,Ti)$；或添加碳、硼等与金属元素形成各类碳化物以强化合金。以γ'（或γ''）时效强化时，主要取决于γ'（或γ''）的数量、大小、γ'（或γ''）本身的固溶强化程度、与基体的错配度、反相畴能大小、过时效转变等因素。碳化物的时效强化作用与其类型、数量、大小、分布有关。

晶界在高温、应力长时作用下是合金的薄弱环节。为改善晶界状态，在合金中添加微量的硼、镁、锆和稀土等吸附



在晶界的元素，造成局部的合金化、提高纯洁度、减缓晶界扩散和强化晶界。

弥散强化是指在基体金属中含有高度分散的第二相质点，从而可达到强化的目的。只是第二相质点不是借助固相转变获得，而是以机械方式直接混入基体。一般以 Al_2O_3、ThO_2 和 Y_2O_3 等氧化物作为弥散质点材料，控制其含量、大小和分布，确定材料的强度。现代高温合金大多数采用多种强化手段，以获得良好的综合性能。

高温合金（特别是铸造高温合金）的合金化较复杂，在高温合金中，除了需控制的杂质元素外，所涉及的合金元素有近 20 种，主要有 Fe、Co、Ni、Ti、Zr、Hf、Nb、Ta、Cr、Mo、W、Re、Al、Mg、Ce、Y、C、B 等。这些合金元素在合金中的作用归纳为六个方面。

1）形成奥氏体基体的元素：Ni、Fe、Co。

2）稳定表面的元素：Cr、Al、Ti、Ta、Y、Re、Hf。其中 Cr、Al、Y、Re、Hf 主要提高合金的抗氧化能力，而 Cr、Ti、Ta 有利于抗热腐蚀。

3）固溶强化元素：W、Mo、Cr、Re、Al、Nb、Ta，固溶到 γ 基体中，起固溶强化作用。

4）金属间化合物形成元素：Al、Ti、Nb、Ta、Hf 和 W，这些元素形成金属间化合物 Ni_3Al、Ni_3Nb、Ni_3Ti。上述元素可固溶进金属间化合物中，进一步强化金属间化合物。

5）碳化物和硼化物形成元素：C、B、Cr、W、Mo、Nb、Ta、Zr、Hf 能形成各种类型碳化物和硼化物相，强化合金。

6）晶界和枝晶间强化元素：B、Mg、Ce、Y、Zr、Hf，这些元素以间隙原子或第二相形式强化晶界或枝晶间。

1.3　高温合金的牌号和化学成分

表 4.6-1 和表 4.6-2 分别列出可用于焊接结构的一些变形高温合金和铸造高温合金的牌号及化学成分。粉末高温合金包括沉淀强化型粉末高温合金和氧化物弥散强化型粉末高温合金（ODS 合金），由于目前国内对其焊接工艺研究极少，本章不作介绍。

1.4　高温合金的力学性能

不同的高温合金具有不同的物理性能，如熔化温度范围、热导率、线膨胀系数、密度、电导率、弹性模量等，同时对高温合金还要求较多的使用性能，如抗氧化性、抗腐蚀性、室温高温拉伸性能、高温持久蠕变性能、高低周疲劳性能、冷热疲劳性能等。通常作为技术条件的性能主要是室温和工作温度下的拉伸性能以及工作温度下的持久性能。表 4.6-3、表 4.6-4 分别列出一些变形高温合金和铸造高温合金的室温高温拉伸性能及高温持久性能。

表 4.6-1　变形高温合金的牌号及化学成分

牌号	化学成分（质量分数）/%														国外相近牌号
	C	Cr	Ni	W	Mo	Fe	Nb	Al	Ti	Mn	Si	S	P	其他	
GH1015	≤0.08	19.0~22.0	34.0~39.0	4.80~5.80	2.50~3.20	余量	1.10~1.60	—	—	≤1.50	≤0.60	≤0.015	≤0.020	B≤0.010 Ce≤0.050	—
GH1016	≤0.08	19.0~22.0	32.0~36.0	5.00~6.00	2.60~3.30	余量	0.90~1.40	—	—	≤1.80	≤0.60	≤0.015	≤0.020	B≤0.010 Ce≤0.050 V0.10~0.30 N0.13~0.25	—
GH1035	0.06~0.12	20.0~23.0	35.0~40.0	2.50~3.50	—	余量	1.20~1.70	≤0.50	0.70~1.20	≤0.70	≤0.80	≤0.020	≤0.030	Ce≤0.050	ЭИ703
GH1131	≤0.10	19.0~22.0	25.0~30.0	4.80~6.00	2.80~3.50	余量	0.17~1.30	—	—	≤1.20	≤0.80	≤0.020	≤0.020	B≤0.005 N0.15~0.30	ЭП126
GH1140	0.06~0.12	20.0~23.0	35.0~40.0	1.40~1.80	2.00~2.50	余量	—	0.20~0.60	0.70~1.20	≤0.70	≤0.80	≤0.015	≤0.025	Ce≤0.050	—
GH2132	≤0.08	13.5~16.0	24.0~27.0	—	1.00~1.50	余量	—	≤0.40	1.75~2.30	1.00~2.00	≤1.00	≤0.020	≤0.030	B 0.001~0.010 V0.10~0.50	A286
GH2150	≤0.08	14.0~16.0	45~50	2.50~3.50	4.50~6.00	余量	0.90~1.40	0.80~1.30	1.80~2.40	≤0.40	≤0.40	≤0.015	≤0.015	B≤0.010 Zr≤0.050 Ce≤0.020 Cu≤0.07	ЭИ718
GH2302	≤0.08	12.0~16.0	38.0~42.0	3.50~4.50	1.50~2.50	余量	—	1.80~2.30	2.30~2.80	≤0.60	≤0.60	≤0.010	≤0.020	B≤0.010 Zr≤0.05 Ce≤0.020	—
GH903	≤0.05	—	36.0~39.0	—	—	余量	2.70~3.50	0.70~1.15	1.35~1.75	≤0.2	≤0.2	≤0.015	≤0.015	Co14.0~17.0 B 0.005~0.010	Incoloy 903
GH907	≤0.06	≤1.00	35.0~40.0	—	—	余量	Nb+Ta 4.30~5.20	≤0.20	1.30~1.80	≤1.00	0.07~0.35	≤0.015	≤0.015	B≤0.012 Co12.0~16.0	Incoloy 907
GH3030	≤0.12	19.0~22.0	余量	—	—	≤1.50	—	≤0.15	0.15~0.35	≤0.70	≤0.80	≤0.020	≤0.030	—	ЭИ435
GH3039	≤0.08	19.0~22.0	余量	0.90~1.30	1.80~2.30	≤3.0	0.90~1.30	0.35~0.75	0.35~0.75	≤0.40	≤0.80	≤0.012	≤0.020	—	ЭИ602

续表 4.6-1

牌号	化学成分（质量分数）/%														国外相近牌号
	C	Cr	Ni	W	Mo	Fe	Co	Al	Ti	Mn	Si	S	P	其他	
GH3044	≤0.10	23.5~26.5	余量	13.0~16.0	≤1.50	≤4.0	—	≤0.50	0.30~0.70	≤0.50	≤0.80	≤0.013	≤0.013	—	ЭИ868
GH3128	≤0.05	19.0~22.0	余量	7.5~9.0	7.5~9.0	≤0.2	—	0.40~0.80	0.40~0.80	≤0.50	≤0.80	≤0.013	≤0.013	B≤0.005 Ce≤0.05 Zr≤0.06	—
GH3536	0.05~0.15	20.5~23.0	余量	0.20~1.00	8.0~10.0	17.0~20.0	0.50~2.50	≤0.50	≤0.15	≤1.00	≤1.00	≤0.015	≤0.025	B≤0.010 Cu≤0.50	Hastelloy X
GH3625	≤0.10	20.0~23.0	余量	—	8.0~10.0	≤5.00	≤1.00	≤0.40	≤0.40	≤0.50	≤0.50	≤0.015	≤0.015	Nb 3.15~4.15 Cu≤0.07	Inconel 625
GH4033	0.03~0.08	19.0~22.0	余量	—	—	≤4.0	—	0.60~1.00	2.40~2.80	≤0.35	≤0.65	≤0.007	≤0.015	B≤0.010 Ce≤0.010	ЭИ437 Б
GH4099	≤0.08	17.0~22.0	余量	5.00~7.00	3.50~4.50	≤2.00	5.00~8.00	1.70~2.40	1.00~1.50	≤0.40	≤0.50	≤0.015	≤0.015	B≤0.005 Ce≤0.020 Mg≤0.01	ЭП693
GH4169	≤0.08	17.0~21.0	50.0~55.0	—	2.80~3.30	余量	≤1.0	0.30~0.70	0.75~1.15	≤0.35	≤0.35	≤0.015	≤0.015	Nb 4.75~5.50 B≤0.006	Inconel 718
GH80A	0.04~0.10	18.0~21.0	余量	—	—	≤1.50	≤2.0	1.00~1.80	1.8~2.7	≤0.40	≤0.80	≤0.015	≤0.020	B≤0.008 Ag≤0.000 5	Nimonic 80A
GH141	0.06~0.12	18.0~20.0	余量	—	9.00~10.50	≤5.00	10.0~12.0	1.40~1.80	3.00~3.50	≤0.50	≤0.50	≤0.015	≤0.015	B0.003~0.010	Rene' 41
GH145	≤0.08	14.0~17.0	Ni+Co ≥70.0	—	—	5.00~9.00	≤1.00	0.40~1.00	2.25~2.75	≤1.00	≤0.50	≤0.010	≤0.015	Nb+Ta 0.70~1.20	Inconel X-750
GH163	0.04~0.08	19.0~21.0	余量	—	5.60~6.10	≤0.70	19.0~21.0	0.30~0.60	1.90~2.40	≤0.60	≤0.40	≤0.007	—	B≤0.005 0 Cu≤0.20 Pb≤0.002 0	C263
GH170	≤0.06	18.0~22.0	余量	17.0~21.0	—	—	15.0~22.0	≤0.50	—	≤0.50	≤0.80	≤0.013	≤0.013	La 0.10 B≤0.005 Zr0.10~0.20	—
GH600	≤0.15	14.0~17.0	Ni+Co ≥72	—	—	6.00~10.00		≤0.35	≤0.50	≤1.00	≤0.50	≤0.015	≤0.040	Nb+Ta ≤1.00	Inconel600
GH652	≤0.10	26.5~28.5	余量	—	—	≤1.0	—	2.8~3.5	—	≤0.30	≤0.80	≤0.012	≤0.012	Ce≤0.03 Ba≤0.08	ЭИ652
GH710	≤0.10	16.5~19.5	余量	1.0~2.0	2.5~3.5	≤1.0	13.5~16.0	2.0~3.0	4.5~5.5	≤0.15	≤0.15	≤0.010	≤0.015	B0.01~0.03 Ce 0.02	Udmet710
GH738	0.03~0.10	18.0~21.0	余量	—	3.50~5.00	≤2.0	12.0~15.0	1.20~1.60	2.75~3.25	≤0.10	≤0.15	≤0.015	≤0.015	B 0.003~0.010 Zr 0.02~0.08	Waspaloy
GH5188	0.05~0.15	20.0~24.0	20.0~24.0	13.0~16.0	—	≤3.0	余量	—	—	≤1.25	4.20~0.50	≤0.015	≤0.020	B≤0.015 La0.03~0.12	HA188
GH605	0.05~0.15	19.0~21.0	9.0~11.0	14.0~16.0	—	≤3.0	余量	—	—	1.0~2.0	≤0.40	≤0.030	≤0.040	—	L605



14

表 4.6-2　铸造高温合金的牌号及化学成分

牌　号	化学成分（质量分数）/%												国外相近牌号
	C	Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	B	Zr	其他	
K213	<0.10	14.0~16.0	34.0~38.0	—	4.0~7.0	—	1.5~2.0	3.0~4.0	余量	0.05~0.10	—	—	З И787Л
K403	0.11~0.18	10.0~12.0	余量	4.5~6.0	4.8~5.5	3.8~5.5	5.3~5.9	2.3~2.9	≤2.0	0.012~0.022	0.03~0.08	Ce0.01	ЖС6К
K405	0.10~0.18	9.5~11.0	余量	9.5~10.5	4.5~5.2	3.5~4.2	5.0~5.8	2.0~2.9	<0.5	0.015~0.026	0.05 ~0.10	—	—
K406	0.10~0.20	14.0~17.0	余量	—	—	4.5~6.0	3.25~4.0	2.0~3.0	≤1.0	0.05~0.10	0.03~0.08	—	ВЖЛ-8
K406C	0.03~0.08	18.0~19.0	余量	—	—	4.5~6.0	3.25~4.0	2.0~3.0	≤1.0	0.05~0.10	≤0.03	—	—
K417	0.13~0.22	8.5~9.5	余量	14~16	—	2.5~3.5	4.8~5.7	4.5~5.0	≤1.0	0.012~0.022	0.05~0.09	V0.6~0.9	IN100
K418	0.08~0.16	11.5~13.5	余量	—	—	3.8~4.8	5.5~6.4	0.5~1.0	≤1.0	0.008~0.020	0.06~0.15	Nb1.8~2.5	INCO713C
K419	0.09~0.14	5.50~6.50	余量	11.0~13.0	9.5~10.5	1.7~2.3	5.2~5.7	1.0~1.5	≤0.5	0.05~0.10	0.03~0.08	Nb2.5~3.3	—
K640	0.45~0.55	24.5~26.5	9.5~11.5	余量	7.0~8.0	—	—	—	≤2.0	—	—	—	X40
DZ4	0.10~0.16	9.0~10.0	余量	5.5~6.0	5.1~5.8	3.5~4.2	5.6~6.4	1.6~2.2	≤2.0	0.012~0.025	≤0.02	—	—
DZ22	0.12~0.16	8.0~10.0	余量	9.0~11.0	11.5~12.5	—	1.75~5.25	4.75~2.25	≤0.35	0.01~0.02	≤0.10	Nb0.75~1.25 Hf1.0~2.0	PWA1422
DZ125	0.07~0.12	8.4~9.4	余量	9.5~10.5	6.5~7.5	1.5~2.5	4.8~5.4	0.7~1.2	≤0.30	0.01~0.02	≤0.08	Ta3.5~4.1 Hf1.2~1.8	DSRene' 125
DD3	≤0.010	9.0~10.0	余量	4.5~5.5	5.0~6.0	3.5~4.5	5.5~6.2	1.7~2.4	≤0.5	≤0.005 0	≤0.007 5	—	—
DD6	0.001~0.04	3.8~4.8	余量	8.5~9.5	7.0~9.0	1.5~2.5	5.2~6.2	≤0.10	≤0.30	≤0.02		Nb0~1.2 Ta6.0~8.5 Re1.6~2.4 Hf0.05~0.15	—
IC6	≤0.02	—	余量	—	—	13.5~14.3	7.4~8.0	—	≤1.0	0.02~0.06	—	—	—
IC6A	≤0.02	—	余量	—	—	13.5~14.3	7.4~8.0	—	≤1.0	0.02~0.06	—	Y0.01~0.05	—



表 4.6-3 变形高温合金的典型力学性能

牌号	状态	品种	试验温度/℃	拉伸性能			持久性能		注[①]
				σ_b/MPa	$\sigma_{P0.2}$/MPa	δ_5/%	σ/MPa	t/h	
GH1015		板材	20	685	—	40	—	—	J
			900	175	—	40	68	20	
GH1016		板材	20	735	—	35	—	—	J
			750	360	—	30	—	—	
			900	185	—	40	68	20	
GH1035	1 100～1 140℃，空冷	板材	20	590	—	35	—	—	J
			700	345	—	35	—	—	
	含铌：1 120℃，10 min，空冷		800	—	—	—	88	100	
			900	—	—	—	44	100	
	含钛：1 120℃，10 min，空冷		800	—	—	—	69	100	
			900	—	—	—	29	100	
GH1131	交货状态	冷轧薄板	20	735	—	34	—	—	J
			900	175	—	40	—	—	
	交货状态	冷轧薄板	700	—	—	—	252	100	
			800	—	—	—	132	100	
			900	—	—	—	60	100	
GH1140		冷轧板	室温	635	—	40	—	—	J
			800	225	—	40	—	—	
	1 080℃ 10 min，空冷	冷轧薄板	20	647～677	255	44～48	—	—	
			800	250～272	148～199	46～79	78	100	
			900	129～138	—	77～85	26	100	
GH2132		冷轧板	室温	885	—	20	—	—	J
			650	735	—	15	392	100	
GH2150	交货状态	冷轧板	20	≤1 100	—	30	—	—	J
			700	800	—	8	490	30	
GH2302	交货状态	冷轧薄板	20	≤1 300	—	30.0	—	—	J
	交货状态＋800℃±10℃，16 h，空冷		800	540	—	8.0	275	23	
GH903	—	—	室温	1 130	880	8.0	—	—	J
			650	—	—	—	490	100	
GH907[②]	热处理制度 A	棒材圆形环形件	20	1 035	725	5	—	—	J
			540	825	585	12	825	60	
	热处理制度 B	棒材圆形环形件	20	1 070	655	5	—	—	
			540	—	—	—	760	100	
	热处理制度 A	环形件	20	1 148	783	15.0	—	—	
			540	991	647	17.5	—	—	
			550	—	—	—	850	225	
	热处理制度 B	环形件	20	1 108	717	7.5	—	—	
			550	—	—	—	899	100	
			700	692	472	29.0	371	100	



续表 4.6-3

牌号	状态	品种	试验温度/℃	拉伸性能			持久性能		注
				σ_b/MPa	$\sigma_{P0.2}$/MPa	δ_5/%	σ/MPa	t/h	
GH3030	980～1 020℃，空冷	冷轧薄板	20	685	—	30	—	—	J
			700	295	—	30	—	—	
	980～1 020℃，空冷	冷轧薄板	20	736	355	42	—	—	
			700	352	193	51	103	100	
			800	175	—	71	40	100	
			900	109	—	71	18	100	
GH3039	—	冷轧板	室温	735	—	40	—	—	J
			800	245	—	40	—	—	
	固溶 1 080℃，空冷	冷轧薄板	20	841	436	48	—	—	
			700	499	270	49	170	100	
			800	284	137	76	81	100	
			900	161	—	68	34	100	
	固溶 1 170℃，空冷	冷轧薄板	800	—	—	—	88	100	
			900	—	—	—	39	100	
GH3044	固溶 1 120～1 160℃	冷轧板	20	735	—	40	—	—	J
			900	195	—	30	—	—	
	固溶 1 120～1 160℃，空冷	冷轧薄板	20	735～883	294～343	45～65	—	—	
			600	588～637	—	55～68	—	—	
			700	500～549	245～275	45～55	217	100	
			800	373～422	216～255	40～55	86	100	
			900	177～245	98～137	50～60	37	100	
GH3128	交货状态	冷轧薄板	20	735	—	40	—	—	J
	交货状态＋1 200℃，空冷		950	175	—	40	54	20	
	交货状态＋1 200℃，空冷	冷轧薄板	20	814	363	62	—	—	
			800	412	226	80	133	100	
			900	251	167	87	63	100	
			950	194	118	97	42	100	
GH3536	—	冷轧薄板	室温	725	310	35	—	—	J
			815	—	—	—	110	24	
	固溶 1 150℃，空冷	冷轧薄板	20	810	388	48	—	—	
			650	580	241	37	300	100	
			800	—	—	—	105	100	
			815	327	222	88	—	—	
GH3625	—	板材	20	830	410	30	—	—	J
			815	—	—	—	114	23	
	1 100℃，空冷	冷轧薄板	20	883	392	65.7	—	—	
			800	400	288	98.7	—	—	
			900	223	166	104.9	—	—	
GH4033	—	—	700	685	—	15	430	60	J
GH4099	1 120℃～1 160℃ 空冷或快冷	板材	20	≤1 130	—	30	—	—	J
			900	375	—	15	118	23	
	固溶 1 120～1 160℃，空冷	冷轧薄板	20	1 042	632	49	—	—	
			800	674	600	11	273	100	
			900	475	419	30	102	100	
GH4169	—	优质棒材	20	1 280	1 030	12	—	—	J
			650	1 000	860	12	690	25	
GH80A	—	板材	20	1 030	640	25	—	—	J
			750	—	—	—	340	30	
GH141	固溶处理＋760℃，16 h，空冷	板材	20	1 170	895	10	—	—	J
			760	965	760	3	—	—	
	1 180℃，30 min，空冷＋900℃，4 h，空冷	冷轧板材	20	1 014	—	15.0	—	—	
			800	770	—	18.0	300	100	
			900	496	—	21.7	135	100	



续表 4.6-3

牌号	状态	品种	试验温度/℃	拉伸性能			持久性能		注①
				σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}$/MPa	δ_5/%	σ/MPa	t/h	
GH145	交货状态	板材	室温	≤930	≤515	—	—	—	J
GH163	—	板材	780	465	—	5	—	—	J
	1 150℃ ± 10℃ 10 min，空冷 + 800℃ ± 10℃ 8 h，空冷	板材	20	1 049	608	40	—	—	
			700	814	451	41	420	100	
			780	618	441	39	—	—	
			800	—	—	—	210	100	
			850	412	353	56	—	—	
			900	206	186	88	59	100	
GH170	1 230℃ ± 10℃空冷	—	20	735	—	40	—	—	J
			1 000	135	—	40	39	100	
GH600	—	冷轧板	20	550	240	30	—	—	J
			900	90	40	60	—	—	
	供应状态	冷轧板	20	718	362	44	—	—	
			700	438	268	70	105	100	
			900	122	85	106	—	—	
GH652	—	棒材	室温	735	—	30	—	—	J
			900	145	—	20	29.4	100	
GH710	—	饼坯锻件	20	980	815	4.0	—	—	J
			980	—	—	—	120	30	
	标准热处理	棒材	20	1 200	860	11	—	—	
			760	1 040	785	25	—	—	
GH738	—	—	815	608	—	20	328	23	J
	标准热处理	棒材	20	1 276	780	26	—	—	
GH5188	—	板材	20	860	380	45	—	—	J
			650	620	250	50	—	—	
			815	—	—	—	165	23	
			927	—	—	—	76	23	
GH605	—	板材	室温	890	370 ~ 550	35	—	—	J
			815	—	—	—	165	24	

① 标有J的为技术标准规定的性能，其他为典型性能数据。

② GH907技术标准规定的持久性能数据为缺口持久性能。缺口半径 r = 0.5 mm 或 0.9 mm；
热处理制度 A 为：980℃，1 h，空冷 + 775℃，12 h，以55℃/h随炉冷至620℃，8 h，空冷；
热处理制度 B 为：1 040℃，1 h，空冷 + 800℃，16 h，以55℃/h随炉冷至620℃，8 h，空冷。



表 4.6-4 铸造高温合金的典型力学性能

牌号	状态	拉伸性能			持久性能			注①
		T/℃	σ_b/MPa	δ_5/%	T/℃	σ/MPa	t/h	
K213	1 100℃，4 h，空冷	700	628	6.0	700	495	40	J
		750	590	4.0	750	373	80	
		20	990	4.0	—	—	—	
		750	725	8.5	750	451	100	
		850	590	10.0	850	216	100	
K403	1 210℃，4 h，空冷或铸态	800	785	2.0	975	195	50	J
K405	铸态	900	675	6	900	315	80	J
		—	—	—	950	215	80	
K406	980℃，5 h，空冷	800	665	4	850	275	50	J
K406C	980℃，5 h，空冷	800	665	4	850	275	50	J
K417	铸态	900	635	6	900	315	70	J
		—	—	—	950	235	40	
K418	铸态	20	755	3.0	750	605	40	J
		800	755	4.0	800	490	45	
K419	铸态	—	—	—	750	685	45	J
		—	—	—	950	255	80	
K640	铸态	—	—	—	816	205	15	J
DZ4	1 220℃，4 h，空冷＋870℃，32 h，空冷	—	—	—	760	725	100	J
		900	735	6	900	315	100	
		—	—	—	950	235	55	
DZ22	1 210℃，2 h，空冷＋870℃，32 h，空冷	室温	980	5	980	220	32	J
DZ125	1 180℃，2 h＋1 230℃，3 h，空冷＋1 100℃，4 h，空冷＋870℃，20 h，空冷	室温	980	5	980	235	32	J
DD3	1 250℃，2 h，空冷＋870℃，32 h，空冷［001］取向	760	1 030	3	1 000	195	70	J
		900	835	6	1 040	165	70	
		20	1 000	26.0	980	226	100	
DD6	1 290℃，1 h＋1 300℃，2 h＋1 315℃，4 h，空冷＋1 120℃，4 h，空冷＋870℃，32 h，空冷，［001］取向	室温	880	8	980	250	100	J
		760	1 000	5	1 070	140	100	
		980	700	18	1 100	130	100	
IC6	真空中 1 260℃，10 h，氩冷，纵向	—	—	—	1 100	90	30	J
	真空中 1 260℃，10 h，氩冷，横向	—	—	—	980	90	354	
		—	—	—	1 100	45	240	
IC6A	1 260℃，10 h，大气中油冷。	—	—	—	1 100	80	100	J

① 标有 J 的为技术标准规定的性能，其他为典型性能数据。

2 高温合金的焊接性

高温合金的焊接性是指在某一工艺条件下，对合金裂纹产生的敏感性、接头组织的均匀性、接头力学性能的等强性和采取工艺措施的复杂性的综合评价。焊接性是高温合金的重要特性，是选用合金的科学依据之一，也是焊接构件设计和焊接工艺制定的重要依据。

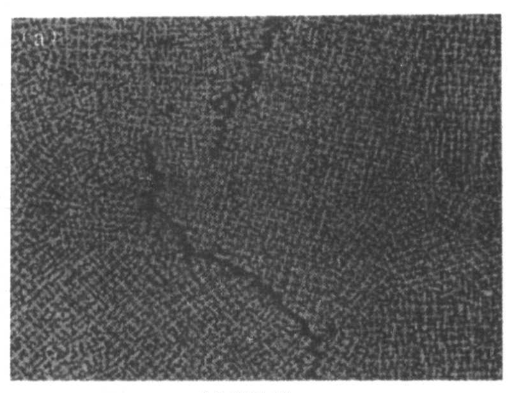
2.1 高温合金焊接接头的裂纹敏感性

高温合金焊接时对焊接质量影响最大的冶金缺陷是焊接接头的热裂纹。因此常把热裂纹敏感性作为评定高温合金焊接性的主要判据。高温合金焊接热裂纹主要有焊缝结晶裂纹、热影响区液化裂纹和在焊后热处理或高温使用时可能形成的应变时效裂纹。

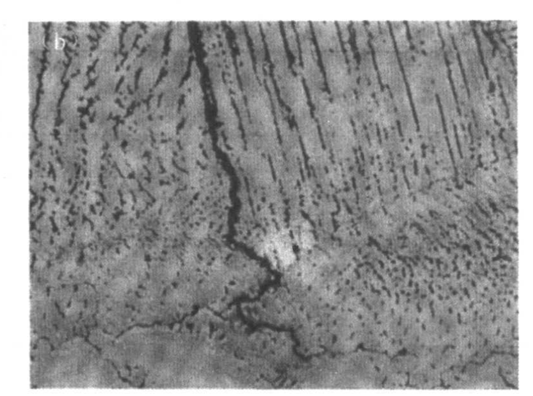
高温合金具有不同程度的焊接热裂纹敏感性。高温合金的化学成分、组织结构、冶金质量和焊件的拘束度、热处理状态、焊接工艺参数等因素都对焊接热裂纹的形成有较大的影响。

2.1.1 结晶裂纹

结晶裂纹是在焊缝金属凝固时形成的，通常沿取向不同



(a) GH150



(b) K406C

图 4.6-1 高温合金氩弧焊焊缝中的结晶裂纹 （×100）

的枝晶交接处或铸造晶粒边界分布，见图 4.6-1，其影响因素主要有被焊母材的化学成分及焊前状态和焊接线能量等。

钨、钼、铬、铝是固溶合金的主要强化元素。钨对高温合金的焊接性无有害影响，适当增加钼的含量，可提高合金的抗裂性。因此含钼和钨或钨很高的镍基合金板材采用钨极氩弧焊、电阻焊、钎焊、电子束焊等方法焊接时，均具有良好的焊接性。含钼较高的镍基合金的焊接性优异，具有很高的抗焊缝形成裂纹的能力。故抗裂性良好的焊丝，HGH3113、SG－1、GH3536、GH533 均含有较多的元素 W 和 Mo，常用作焊接热裂敏感性大的合金和拘束度大的构件。

铝、钛和铌等是沉淀强化高温合金的主要强化元素。铝、钛对高温合金的焊接性有较大的影响，随着两者含量的提高，合金的焊接性变差，不仅在焊接过程中会产生结晶裂纹和液化裂纹，而且还会在焊后热处理或高温加热过程中产生应变时效裂纹。此外，还应考虑到铝和钛的含量之比。在铝和钛总量相近条件下，高铝和钛之比的合金具有高的裂纹敏感性，故应控制在小于 2 为宜。图 4.6-2 示出合金焊接性与铝、钛含量的关系。图中将高温合金分为三类：A 类易焊合金，为铝钛含量低［w（Al＋Ti）低于 2%］的固溶强化合金；B 类可焊合金，为铝钛含量较高［w（Al＋Ti）达 4%］的沉淀强化变形合金；C 类难焊合金，为铝钛含量更高［w（Al＋Ti）大于 6%］的沉淀强化铸造合金或工艺性差的变形合金。

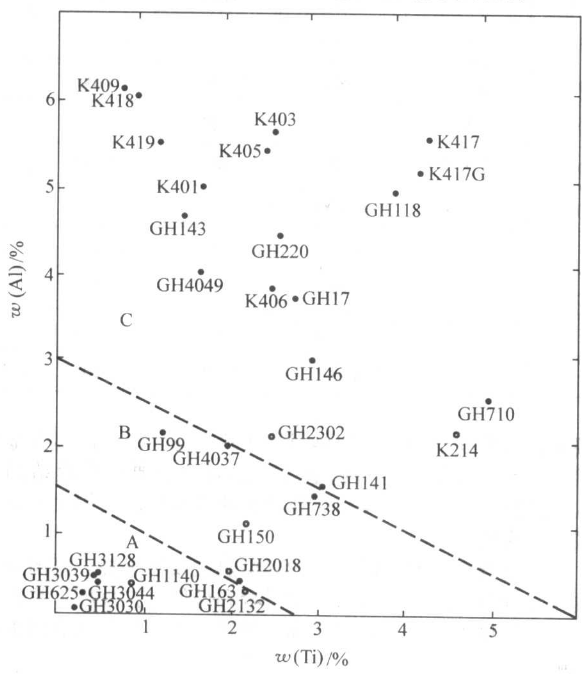


图 4.6-2 高温合金焊接性与 Al、Ti 含量的关系
A—易焊合金；B—可焊合金；C—难焊合金

碳在高温合金中均以碳化物（$M_{23}C_6$、M_6C、MC 等）形式存在于晶界，其性质一般是硬而脆。当含碳量低且碳化物以球状或链状分布于晶界时，对合金具有良好的强化作用，当碳含量较高时，则会析出连续薄膜、胞状或魏氏组织形态的碳化物，对合金的韧性和焊接性有不良影响。碳和硼还可能形成碳硼化物共晶，将导致焊接裂纹形成。

微量硼可净化晶界，改善合金的综合性能，锆亦有类似作用。但当硼、锆含量稍高时，会形成 M_3B_2、Ni_5Zr 与基体的低熔点共晶，促使焊接裂纹的形成。

硫、磷与镍形成低熔点共晶，并向焊缝金属的晶界偏析，将促使焊缝结晶裂纹的形成。

铜也是促使一些高温合金产生焊接裂纹的有害元素，例如微量铜可使钴基合金焊缝产生微裂纹，故应防止铜污染。

此外，合金中添加的强化元素种类复杂或较多时，亦会使其焊接裂纹敏感性增大。

高温合金的焊前状态也影响焊接裂纹敏感性。所谓焊前状态主要指合金构件的热处理状态，冷变形程度及拘束状态等。固溶状态的合金比时效状态的合金具有较小的裂纹敏感性（见表 4.6-5）；合金淬火软化状态比平整和冷轧状态具有较小的裂纹敏感性（见表 4.6-6）。这是因为在平整或冷变形后，合金的硬度和强度增加，塑性下降，时效处理亦然，致使焊接件的拘束度增大，裂纹敏感性也就增大。因此，高温合金应在固溶处理或淬火软化状态下进行焊接，特别是经过深度冲压成形或严重冷作校形的构件，焊前应作消除应力处理。

表 4.6-5 GH2150 合金不同热处理状态的裂纹敏感性

焊前热处理状态	母材室温拉伸性能		裂纹敏感性系数 K_1/%	工艺条件
	σ_b/MPa	δ_5/%		
1 120℃固溶	850	58	9.1	用变拘束十字型试验方法，板厚 1.5 mm，氩弧焊工艺
1 120℃固溶＋800℃ 8 h 时效	1 230	23	20.5	

表 4.6-6 GH1140 合金不同状态的裂纹敏感性

焊前状态	不同炉号合金裂纹敏感性系数 K_1/%			工艺条件
	上限成分	中限成分	下限成分	
固溶处理	15	8	5	用变拘束十字型裂纹试验方法，板厚 1.5 mm，钨极氩弧焊工艺
平整（变形量 3%～5%）	—	16.5	17	
冷轧（变形量 30%）	30	31	—	



焊接线能量对高温合金的裂纹敏感性也有明显的影响，高温合金的裂纹敏感性随焊接线能量增大而增大。因为高温合金的热导率低，线膨胀系数大，对过热敏感。当焊接线能量大时，温度过高，合金易于过热，接头区温度梯度大，使焊接应力相应增大。应当指出，这里所述的焊接线能量主要指焊接电流，该参数是影响高温合金焊接裂纹敏感性的决定因素。

消除焊接结晶裂纹可以采取如下措施，首先制订焊接工艺时应选用小的焊接电流，减小焊接热输入，改善熔池结晶形态，减小枝晶偏析，从而减小裂纹形成几率。第二，采用抗裂性优良的焊丝，如 HGH3113、SG－1、HGH3536、GH533。第三，建议在固溶状态或淬火状态下焊接。在采取上述措施仍不能消除裂纹时，在结构与接头强度允许的条件下，可采用摩擦焊、扩散焊或真空钎焊工艺代替熔焊工艺。

2.1.2 液化裂纹

大多数高温合金焊接时具有产生液化裂纹的倾向性，合金元素含量多的合金产生液化裂纹的倾向较显著。液化裂纹产生在近缝区中，具有沿晶开裂，从熔合线向母材扩展的特征（图 4.6-3）。电阻焊时，在焊接压力作用下，大多数液化裂纹有自愈的可能，这时被称为“局部液化”。液化裂纹与高温合金晶界上存在多种相和焊接时非常快的加热速度有关。高温合金中含有较多的强化元素，在晶界会形成碳化物相，其中部分为共晶组织，部分相会产生溶解和析出相变。焊接时，靠近焊接熔池的某些相，如 NbC 被迅速加热到固-液相区的温度，晶界上的这些相来不及发生平衡转变，在原相的界面上形成液膜，于是造成晶界液化。晶界液化的液膜，承受不住拘束应力的作用，则被拉裂，形成液化裂纹。

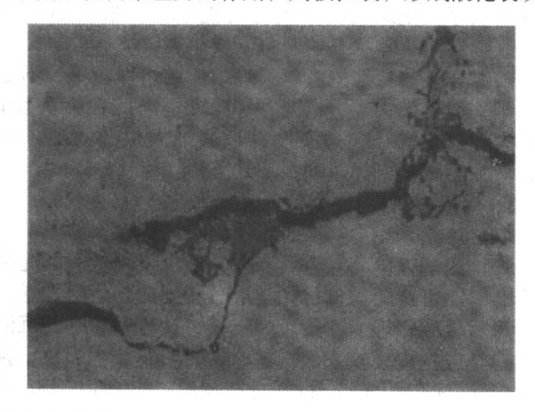


图 4.6-3 K406C 合金氩弧焊热影响区的液化裂纹（×400）

生产实践证明，在氩弧焊、电子束焊、电阻点焊及缝焊高温合金的近缝区往往形成较多的沿晶界的局部熔化，未构成液化裂纹。应严格区分这两种不同性质的冶金现象。

高温合金的状态对形成液化裂纹有较大影响。合金的晶粒粗大，晶界上有较多碳化物、硼化物、$\gamma+\gamma'$共晶，焊接时很易形成液化裂纹。

减小和避免液化裂纹的方法是尽可能降低焊接热输入，减小过热区和母材高温停留时间。

2.1.3 应变时效裂纹

铝钛含量高的沉淀强化高温合金和铸造高温合金焊接后，在时效处理过程中，在熔合线附近会产生一种沿晶扩展的裂纹，被称为应变时效裂纹。

应变时效裂纹的形成机理至今尚无统一认识，但已证实其形成与下述二因素相关：一是焊接残余应力和拘束应力引起的应变，二是时效过程中塑性损失，二者共同作用引起应变时效裂纹。

为避免应变时效裂纹，在选用合金时，应选择含 Al、Ti 较低，或用 Nb 代替部分 Al、Ti 的合金。也可以对合金进行“过时效”处理（分级、慢冷的时效工艺），延长开裂时间，从而防止应变时效裂纹。在焊接接头设计时，选用合理的接头形式和焊缝分布，以减小焊件的拘束度。焊接时调节焊接热循环，避免热影响区中碳化物产生相变而引起的脆性。最有效的方法是焊后对焊缝和热影响区进行合理的锤击或喷丸处理，变拉应力状态为压应力状态。

2.2 焊接接头组织的不均匀性

固溶强化型高温合金焊接后，焊缝金属由变形组织变成铸造组织。由于焊接熔池冷却速度快，焊缝金属会因晶内偏析，形成层状组织（见图 4.6-4）。当偏析严重时，会在枝晶间形成共晶组织。焊缝中的 TiN 或 Ti（CN）为不规则的随意分布的独立相。碳化物相多为 MC 相。接头热影响区显著变化是产生沿晶界的局部熔化和晶粒长大（见图 4.6-5）。局部熔化和晶粒长大的程度依合金成分和焊接工艺不同而异。如 GH3044 合金比 GH3039 合金的晶粒长大明显，在 GH3044 合金焊缝两侧形成两条粗晶带，直接影响接头的拉伸性能和疲劳性能。

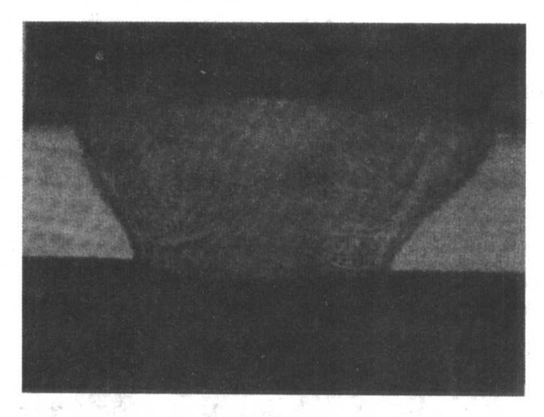


图 4.6-4 GH150 氩弧焊焊缝层状组织（×12）

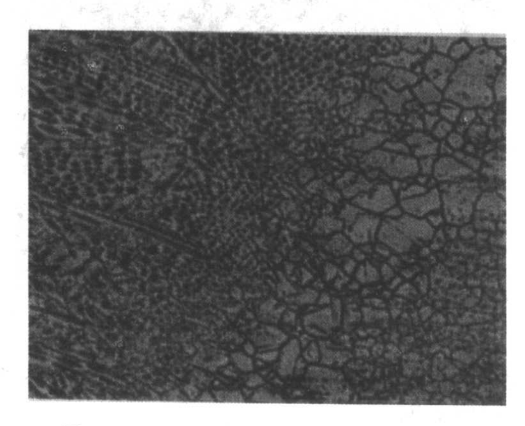


图 4.6-5 GH4099 氩弧焊热影响区组织（×100）

电阻点焊和缝焊时，熔核内常常形成由层状组织和成分偏析造成的“枝晶加粗”组织。在不同牌号高温合金组合焊接时，这种现象更为突出。“枝晶加粗”组织在生产中往往易误判为裂纹。在电阻焊的焊点热影响区会产生“胡须”组织和局部熔化组织（见图 4.6-6），还会产生轻微的晶粒长大。胡须组织是从熔核边缘向母材扩展的内部填满铸造组织的形状类似裂纹的一种特殊组织，是高温合金电阻点焊和缝焊时普遍存在的一种现象。“胡须”和局部熔化在浸蚀不当时，也易误判为裂纹。事实上只要胡须中填满铸造组织则不会影响接头的常规力学性能。经高温长期服役后，由于元素扩散，除碳化物聚集长大外，胡须组织已变得模糊，组织均匀化，未发现影响焊件的使用性能。



图 4.6-6　GH1140 电阻缝焊的胡须组织（×100）

沉淀强化型高温合金和铸造高温合金的焊接接头，不论焊缝还是热影响区都比较复杂焊缝金属经历了熔化凝固的过程，强化相 γ′或 γ″和碳化物、硼化物等均溶入基体，形成单一的 γ 固溶体组织。某些合金会生成初生 γ′，会从液态金属中析出 MC。由于焊缝金属冷却速度很快，形成了横向枝晶很短主轴很长的树枝状晶（见图 4.6-7），在树枝状晶间和主轴之间均存在较大的成分偏析（后者为晶内偏析），在焊缝中央会产生共晶成分的组织。

焊接接头热影响区的组织非常复杂。如 GH4169 合金焊接热影响区中，在靠近焊缝的高温区（≥1 030℃），γ′、γ″和 δ 相会溶入 γ 基体中，失去了 γ′或 γ″的强化效果，在这一区中晶粒明显长大。在中温区（1 030～760℃），亚稳 γ″相转变为 δ 魏氏组织，强度和塑性显著下降。在低温区（760～600℃），晶界会析出小片状（块状）δ 相，对高温性能有益。此外，在整个热影响区中 NbC 相不变，为块状。

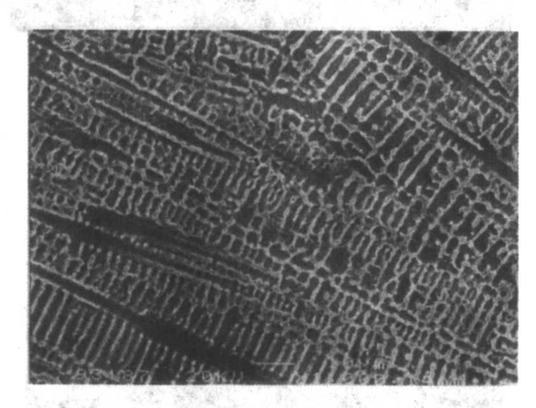


图 4.6-7　电子束焊缝的树枝状组织

由此可见，焊缝和热影响区是不均匀的组织，这将影响接头的力学性能。

2.3　焊接接头的等强性

高温合金构件通常在高温、复杂应力和有腐蚀介质的恶劣环境中工作，因此要求焊接接头应抗氧化、耐腐蚀，具有良好的高温强度、塑性和疲劳性能，而且希望接头的高温强度、塑性与母材一样，即所谓等强性。但事实上，焊接接头在焊态下的强度和塑性都不同程度地低于母材。

焊接接头的等强性常用接头强度系数 K_σ 表示。其定义为 K_σ = 接头 σ_b/母材 $\sigma_b \times 100\%$。

固溶强化型高温合金手工氩弧焊和自动氩弧焊的接头强度系数可达到 90%～95%；电子束焊的接头强度系数可达到 95%～98%；摩擦焊的接头强度系数可达到 95%～100%。沉淀强化型高温合金的接头强度系数普遍较低，如氩弧焊的 K_σ 为 82%～90%，焊后经固溶和时效处理后，接头强度可接近母材水平。当采用非同质焊丝（不同于母材的焊丝）时，接头的强度更难以达到母材水平。接头塑性更加复杂。由于存在余高的影响及测试技术方面的问题，接头塑性较难与母材进行比较，只有采用棒状试样（厚板试样加工而成）才能进行比较。高温持久试样同样存在上述问题。但总体来说，接头塑性和持久性能均存在低于母材的特征，而且依不同的焊接工艺而不同。

焊接接头强度系数低与接头组织的不均匀性密切相关。焊缝及热影响区中晶粒长大、γ′强化相和碳化物的溶解形成的弱化区直接影响接头性能。在拉伸过程中，弱化区与硬化区阻碍试样的均匀变形。焊缝的存在影响了试样的均匀变形，使大部分塑性变形发生在弱化区，最终颈缩和断裂发生在热影响区，因此接头的强度和塑性都较低。

3　高温合金的惰性气体保护电弧焊

高温合金焊接件普遍采用钨极惰性气体保护电弧焊（氩弧焊）和熔化极惰性气体保护电弧焊，很少采用焊条电弧焊和埋弧焊，不采用氧－乙炔焊。

3.1　钨极惰性气体保护电弧焊

3.1.1　焊接特点

固溶强化型高温合金氩弧焊具有良好的焊接性。焊接操作时只要采取较小的热输入和稳定的电弧，则可避免结晶裂纹，获得良好质量的接头，无需采取其他工艺措施。

沉淀强化型高温合金氩弧焊时焊接性较差，有一定困难。要求合金在固溶状态下焊接，合理地设计焊接接头形式及焊接顺序，使结构拘束度尽可能小，并采用小的焊接电流，改善熔池结晶状态，避免形成热裂纹。

高温合金的特性造成氩弧焊熔池的熔深较小，不足碳钢的一半，为奥氏体不锈钢熔深的 2/3，因此在接头设计时，应加大坡口，减小钝边高度并适当加大根部间隙，在操作中，应注意防止未焊透和根部缺陷。

3.1.2　焊接材料

（1）焊丝

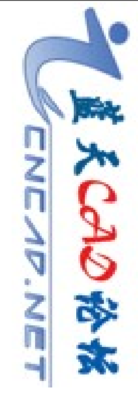
焊接固溶强化高温合金和铝、钛含量较低的沉淀强化高温合金时，可选用与母材化学成分相同或相近的焊丝，以获得与母材性能相近的接头。焊接铝、钛含量较高的沉淀强化高温合金或拘束度较大的构件时，为防止产生裂纹，推荐选用抗裂性好的 Ni－Cr－Mo 系合金焊丝，如 HGH3113、SG－1、GH3536 等。采用这类焊丝焊接后，焊缝金属不能经热处理强化，接头强度低于母材。若选用含铝、钛的 GH533 合金焊丝，使接头具有一定的抗裂性和较高的力学性能，可通过时效处理提高接头的性能。钴基高温合金可采用与母材成分相同或 Ni－Cr－Mo 系合金焊丝。常用的高温合金焊丝的牌号及化学成分见表 4.6-7 和表 4.6-8。手工氩弧焊时，可以采用母材合金板材的切条作为焊接填充材料。

不同牌号高温合金组合焊接时，焊丝的选用原则是：在满足接头性能要求的情况下，首先选用组合焊接合金中焊接性好、成本低的焊丝，抗裂性不能满足要求时，则可选用 Ni－Cr－Mo 系焊丝。高温合金钨极氩弧焊用的焊丝可参照表 4.6-9 选择。

（2）保护气体

高温合金惰性气体保护电弧焊可采用氩、氦或氩氦混合气体作为保护气体。氩气的成本低、密度大，保护效果好，是常用的保护气体。氩气中引入 5% 以下的氢气，在焊接过程中有还原作用，但只用于第 1 层焊道或单焊道的焊接，否则会产生气孔。

（3）钨极



3

表 4.6-7 焊接用高温合金冷拉丝材（摘自 GJB 2612—1996）

合金牌号	化学成分（质量分数）/%																
	C	Cr	Ni	W	Mo	Al	Ti	Fe	Nb	V	B	Ce	Mn	Si	P	S	Cu	其他
HGH1035	0.06~0.12	20.0~23.0	35.0~40.0	2.50~3.50	—	≤0.50	0.70~1.20	余量	—	—	—	≤0.05	≤0.70	≤0.80	≤0.020	≤0.020	≤0.20	—
HGH1040	≤0.10	15.0~17.5	24.0~27.0	—	5.50~7.00	—	—	余量	—	—	—	—	1.00~2.00	0.50~1.00	≤0.030	≤0.020	≤0.20	N：0.10~0.20
HGH1068	≤0.10	14.0~16.0	21.0~23.0	7.00~8.00	2.00~3.00	—	—	余量	—	—	—	≤0.02	5.00~6.00	≤0.20	≤0.010	≤0.010	—	—
HGH1131	≤0.10	19.0~22.0	25.0~30.0	4.80~6.00	2.80~3.50	—	—	余量	0.70~1.30	—	≤0.005	—	≤1.20	≤0.80	≤0.020	≤0.020	—	N：0.15~0.30
HGH1139	≤0.12	23.0~26.0	14.0~18.0	—	—	—	—	余量	—	—	≤0.010	—	5.00~7.00	≤1.00	≤0.030	≤0.025	≤0.20	N：0.25~0.45
HGH1140	0.06~0.12	20.0~23.0	35.0~40.0	1.40~1.80	2.00~2.50	0.20~0.60	0.70~1.20	余量	—	—	—	—	≤0.70	≤0.80	≤0.020	≤0.015	—	—
HGH2036	0.34~0.40	11.5~13.5	7.0~9.0	—	1.10~1.40	—	≤0.12	余量	0.25 0.50	1.25~1.55	—	—	7.50~9.50	0.30~0.80	≤0.035	≤0.030	—	—
HGH2038	≤0.10	10.0~12.5	18.0~21.0	—	—	≤0.50	2.30~2.80	余量	—	—	≤0.008	—	≤1.00	≤1.00	≤0.030	≤0.020	≤0.20	—
HGH2042	≤0.05	11.5~13.0	34.5~36.5	—	—	0.90~1.20	2.70~3.20	余量	—	—	—	—	0.80~1.30	≤0.60	≤0.020	≤0.020	≤0.20	—
HGH2132	≤0.08	13.5~16.0	24.5~27.0	—	1.00~1.50	≤0.35	1.75~2.35	余量	—	0.10~0.50	0.001~0.010	—	1.00~2.00	0.40~1.00	≤0.020	≤0.015	—	—
HGH2135	≤0.06	14.0~16.0	33.0~36.0	1.70~2.20	1.70~2.20	2.40~2.80	2.10~2.50	余量	—	—	≤0.015	≤0.03	≤0.40	≤0.50	≤0.020	≤0.020	—	—
HGH3030	≤0.12	19.0~22.0	余量	—	—	≤0.15	0.15~0.35	≤1.0	—	—	—	—	≤0.70	≤0.80	≤0.015	≤0.010	≤0.20	—
HGH3039	≤0.80	19.0~22.0	余量	—	1.80~2.30	0.35~0.75	0.35~0.75	≤3.0	0.90~1.30	—	—	—	≤0.40	≤0.80	≤0.020	≤0.012	≤0.20	—
HGH3041	≤0.25	20.0~23.0	72.0~78.0	—	—	≤0.06	—	≤1.7	—	—	—	—	0.20~1.50	≤0.60	≤0.035	≤0.030	≤0.20	—
HGH3044	≤0.10	23.5~26.5	余量	13.6~16.0	—	≤0.50	0.30~0.70	≤4.0	—	—	—	—	≤0.50	≤0.80	≤0.013	≤0.013	≤0.20	—
HGH3113	≤0.08	14.5~16.5	余量	3.00~4.50	15.0~17.0	—	—	4.0~4.7	—	≤0.35	—	—	≤1.00	≤1.00	≤0.015	≤0.015	≤0.20	—
HGH3128	≤0.05	19.0~22.0	余量	7.50~9.00	7.50~9.00	0.40~0.80	0.40~0.80	≤2.0	—	—	≤0.005	≤0.05	≤0.50	≤0.80	≤0.013	≤0.013	—	Zr≤0.06
HGH3536	0.05~0.15	20.5~23.0	余量	0.20~1.00	8.00~10.0	—	—	17.0~20.0	—	—	≤0.010	—	≤1.00	≤1.00	≤0.025	≤0.025	—	Co：0.50~2.50

续表 4.6-7

合金牌号	化学成分（质量分数）/%																
	C	Cr	Ni	W	Mo	Al	Ti	Fe	Nb	V	B	Ce	Mn	Si	P	S	Cu	其他
HGH3600	≤0.10	14.0~17.0	≥72.0	—	—	—	—	6.0~10.0	—	—	—	—	≤1.00	≤0.50	≤0.020	≤0.015	≤0.50	Co≤1.00
HGH4033	≤0.06	19.0~22.0	余量	—	—	0.60~1.00	2.40~2.80	≤1.0	—	—	≤0.010	≤0.01	≤0.35	≤0.65	≤0.015	≤0.007	≤0.07	—
HGH4145	≤0.80	14.0~17.0	余量	—	—	0.40~1.00	2.50~2.75	5.0~9.0	0.70~1.20	—	—	—	≤1.00	≤0.50	≤0.020	≤0.010	≤0.20	—
HGH4169	≤0.08	17.0~21.0	50.0~55.0	—	2.80~3.30	0.20~0.60	0.65~1.15	余量	4.75~5.50	≤0.006	—	—	≤0.35	≤0.30	≤0.015	≤0.15	—	—

表 4.6-8 其他两种抗裂性好的高温合金焊丝

合金牌号	化学成分（质量分数）/%														国外相近牌号
	C	Cr	Ni	W	Mo	Al	Ti	Co	Fe	B	Ce	Mn	Si	S	P	
SG-1	≤0.12	3.0~6.0	余量	—	23.0~26.0	—	—	≤2.5	4.0~7.0	—	—	<1.0	<1.0	≤0.03	≤0.03	HastellovW
GH533	≤0.10	19.0~22.0	余量	7.0~9.0	7.0~9.0	≤0.40	2.3~2.9	≤3.0	3.0	≤0.005	≤0.02	≤0.50	≤0.60	≤0.01	≤0.015	ЭИ533

表 4.6-9 相同和不同牌号高温合金钨极氩弧焊用的焊丝（摘自 HB/Z 164—1990）

合金牌号	GH3030	GH3039	GH3044	G3128	GH3625	GH3536	GH163	GH4169	GH4099	GH1015	GH1016	GH1140	GH1035	GH2132	GH2302	GH2150	GH5188	GH605
GH3030	1																	
GH3039	1，2	2																
GH3044	1，3	2，3	3															
GH3128	1，4	2，4	3，4	4														
GH3625	1，5	2，5	3，5	4，5	5													
GH3536	1，6	2，6	3，6	6	5，6	6												
GH163	1，7				5，7	6，7	7											

续表 4.6-9

合金牌号	GH 3030	GH 3039	GH 3044	GH3128	GH 3625	GH 3536	GH 163	GH 4169	GH 4099	GH 1015	GH 1016	GH 1140	GH 1035	GH 2132	GH 2302	GH 2150	GH 5188	GH 605
GH4169	1，8				5，8，19	6，8	7，8，19	8										
GH4099	1，9，21	2，9，21	3，9，21						9									
GH1015	1，10	2，10	3，10			6，10			9，10，21	10								
GH1016	1，11	2，11	3，11			6，11			9，11，21	10，11	11							
GH1140	1，12	2，12	3，12	4，12		6，12			9，12，6	10，12	11，12	12						
GH1035	1，13	2，13	3，13									12，13	13					
GH2132	1，14	2，14	3，14		5，14，19	6，14	7，14，19	8，14，20				12,14,19		14				
GH2302	1，15	2，15	3，15			6，15									15			
GH2150	1，16，21	2，16，21	3，16，21						9，16，21			12,16,21				16，21		
GH5188	1，17，20				5，18，20	6，17，20	7，17，20	8，17，20						14,17,20			17	
GH605	18，20				5，20	6，18，20	7，18，20	8，18，20									17,18,20	18

注：1～21分别为不同牌号焊丝的代号，每一数字代表的焊丝牌号如下：
1—HGH3030；2—HGH3039；3—HGH3044；4—HGH3128；5—GH3625；6—HGH3536；7—GH163；8—HGH4169；9—GH4099；10—GH1015；11—GH1016；12—HGH1140；13—HGH1035；14—HGH2132；15—GH2302；16—GH2150；17—GH5188；18—GH605；19—HGH3113；20—SG-1；21—GH533



常用的钨极有钍钨极（WTh15）和铈钨极（WCe20）。铈钨极的电子发射能力强、引弧电压低、电弧稳定性好、许用焊接电流大、烧损率低，故推荐使用铈钨极。钨极直径根据焊接电流选定，并加工成锥形电极。

3.1.3 焊接接头设计

高温合金氩弧焊时，熔池的流动性较差，熔深较小。接头设计时要求较大的坡口角度和根部间隙、较小的钝边高度，参见图4.6-8。

3.1.4 焊接工艺

焊件在装配、定位焊和焊接前应彻底清除焊接处和焊丝表面的氧化物、油污等，并保持清洁。定位焊宜在夹具上进行，以保证装配质量。为使焊接区快速冷却，常采用激冷块和垫板。垫板上开有适当尺寸的成形槽。成形槽一般为弧形，槽内有均匀分布的通入保护气体的小孔，以对焊缝背面进行保护并保证焊缝背面成形良好。激冷块和垫板用纯铜制成。焊接钴基高温合金时，应采用表面镀铬的纯铜垫板。因为微量的铜污染可导致焊缝产生热裂纹。焊缝两端可预装能拆除的引弧板和收弧板，其材料牌号与母材相同，以避免引弧和收弧缺陷。

焊接时采用直流电流、正极性和高频引弧，焊接电流可控制递增和衰减。典型的焊接工艺参数列于表4.6-10和表4.6-11。在保证焊透的条件下，应采用较小的焊接热输入。多层焊时，应控制层间温度。焊接时效强化及热裂敏感性大的合金时，应严格控制焊接热输入。应保证电弧稳定燃烧，焊枪保持在接近垂直位置。弧长尽量短，不加焊丝时，弧长小于1.5 mm；加焊丝时，弧长与焊丝直径相近。薄件焊接时，焊枪不作摆动。多层焊时，为使熔敷金属与母材和前焊道充分熔合，焊枪可适当摆动。

薄板高温合金构件焊前不需预热，推荐在固溶或退火状态下焊接。厚板构件（厚度大于4 mm），因拘束度大，焊前可适当预热，焊后应及时进行消除应力处理，以防止产生裂纹。

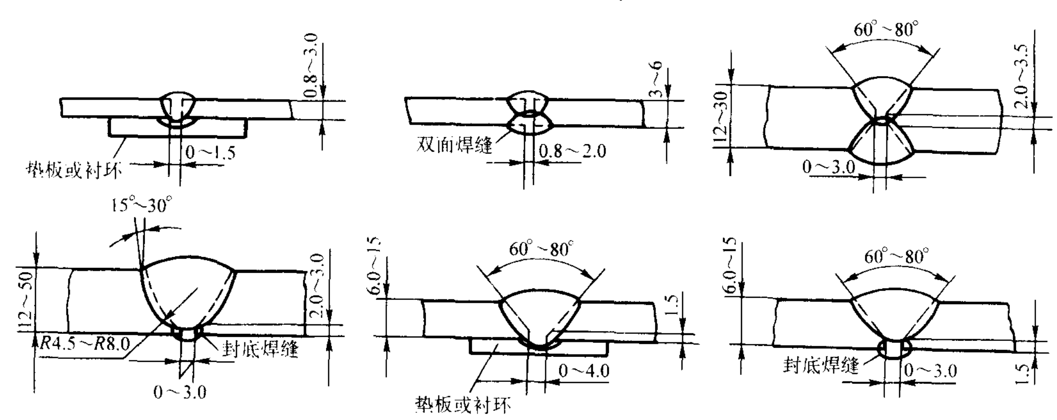


图4.6-8 高温合金对接焊接的接头形式

表4.6-10 高温合金手工钨极氩弧焊的焊接参数（摘自 HB/Z 164—1990）

母材厚度/mm	焊丝直径/mm	钨极直径/mm	焊接电流/A	氩气流量/L·min^{-1}	电弧电压/V
0.5	0.5~0.8	1.0~1.2	15~25	5~8	10
0.8	0.8~1.0	1.0~1.5	20~35	5~8	10
1.0	1.0~1.2	1.2~1.5	30~50	8~10	10
1.2	1.0~1.6	1.5~2.0	40~55	8~10	10~12
1.5	1.2~1.6	1.5~2.0	50~75	10~15	10~12
1.8	1.6~2.0	1.5~2.0	65~85	10~15	12
2.0	1.6~2.5	2.0~2.5	70~90	12~15	12
2.5	2.0~2.5	2.0~2.5	90~100	12~15	12~15
3.0	2.5	2.5~3.0	110~130	15~20	12~15
4.0	2.5	2.5~3.0	120~140	15~20	15

注：1. 表中所列为推荐的焊接参数，作为制定最佳焊接参数的依据。
2. 焊接铁基、钴基及时效硬化合金时，在保证焊透的情况下宜选用较小的焊接电流。

表4.6-11 高温合金自动钨极氩弧焊的焊接参数（摘自 HB/Z 164—90）

母材厚度/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/m·min^{-1}	氩气流量/L·min^{-1}		焊丝直径/mm	送丝速度/m·min^{-1}	钨极直径/mm	喷嘴直径/mm
				正面	反面				
0.8	40~70	10~12	0.40~0.50	8~10	3~5			0.8~2.5	10~14
1.0	60~100	10~12	0.40~0.50	8~10	3~5	0.8~1.0	0.45~0.65	1.5~2.5	10~14
1.2	90~130	10~15	0.40~0.60	10~15	4~6	0.8~1.0	0.25~0.40	2.0~3.0	10~16
1.5	110~150	12~15	0.30~0.50	10~15	4~6	0.8~1.0	0.25~0.40	2.0~3.0	10~16
1.8	120~160	12~15	0.30~0.45	15~20	5~8	1.2~1.6	0.25~0.40	3.0~3.5	14~16
2.0	130~180	12~15	0.30~0.45	15~20	5~8	1.2~1.6	0.25~0.40	3.0~3.5	16~18

注：1. 接头形式为I形对接。
2. 表中所列为推荐的焊接参数，作为制定最佳焊接参数的依据。
3. 焊接铁基、钴基及时效硬化合金时，在保证焊透的情况下宜选用较小的焊接电流。
4. 焊接电流衰减时间根据材料的焊接性及焊接电流大小控制在5~10 s。



钴基高温合金焊接性良好，推荐采用钨极惰性气体保护电弧焊。钴基高温合金钨极惰性气体保护焊的工艺与镍基高温合金基本相同，但应注意低熔点元素的污染。焊前应对待焊处及焊丝表面进行仔细的清理，焊接时采用表面镀铬的纯铜垫板或不锈钢垫板。

铸造镍基高温合金的焊接性很差，一般不采用电弧焊方法焊接。这类合金如需焊接或与其他合金组合焊接时，应注意防止焊接接头产生热裂纹。焊接时应采用很小的焊接热输入，熔敷金属尽量少，熔深尽量小，焊前预热，焊后应立即进行消除应力热处理。或采用扩散焊和钎焊工艺。

3.1.5　焊接缺陷及防止

氩弧焊接头的缺陷，一般可分为两类。一类为不允许存在的缺陷，包括裂纹、烧穿、未熔合和焊瘤。另一类是允许适量存在的缺陷，包括气孔、未焊透、夹杂物、咬边、凹坑（未焊满）和塌陷。其允许存在及允许修补的数量与大小，根据焊缝受力状态、焊缝的重要程度而确定，可参考各行业标准。

最易产生且危害最大的缺陷是裂纹。防止方法主要有：合理设计焊接接头和合理安排焊接次序，减小结构的拘束度；选用抗裂性优良的焊丝；采用小的焊接电流，减小热输入，填满收弧弧坑，防止弧坑裂纹。

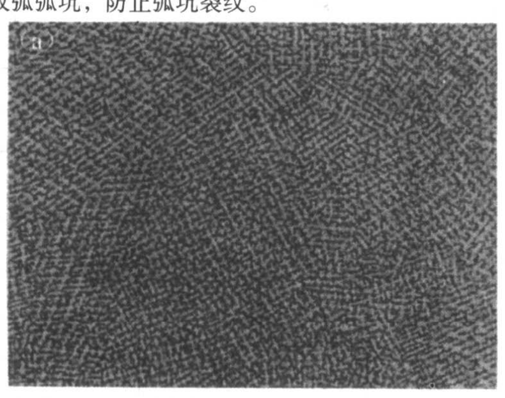
气孔和夹杂也是高温合金氩弧焊易产生的缺陷。防止方法主要有：注意焊前清理（包括焊件和焊丝），最好采用化学清理方法；注意铜垫板的清洁；焊接时应保持稳定的电弧电压；注意钨极直径与焊接电流相适应，防止焊接时钨极与熔池接触，造成钨夹杂。在引弧和收弧时易产生气孔和缩孔，必须注意其质量。

3.1.6　接头组织

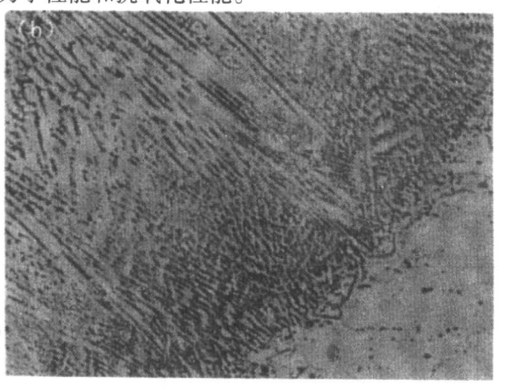
高温合金钨极惰性气体保护电弧焊接头在固溶和焊态下的组织为单相奥氏体（γ 相）和少量碳、氮化钛质点［TiC、TiN 和 TiC（N）］。焊缝金属为铸造组织，其边缘为联生结晶，其后是方向性很强的枝状晶，中心处为等轴晶，见图 4.6-9。时效强化合金焊后经固溶和时效处理，接头组织为 γ 相和 γ′ 相［Ni_3Al（Nb）］及少量碳化物相（M_6C、$M_{23}C_6$），焊缝金属区的枝状晶部分消失。

3.1.7　接头性能

高温合金钨极氩弧焊接头的力学性能较好，接头强度系数可达 90%。接头的抗氧化和热疲劳性能与母材相近。异种合金组合焊的接头性能也较好，可满足使用要求。表 4.6-12 和表 4.6-13 分别列出了一些高温合金钨极氩弧焊接头的力学性能和抗氧化性能。



(a) 焊缝中心



(b) 熔合区

图 4.6-9　GH150 氩弧焊接头焊态组织（×100）

表 4.6-12　变形高温合金钨极氩弧焊接头的力学性能

合金牌号	焊接方法	焊前处理	焊后处理	母材规格/mm	焊丝牌号	试验温度/℃	接头拉伸性能		接头持久性能	
							σ_b/MPa	强度系数/%	σ/MPa	t/h
GH1015	手工	1 140 ~ 1 170℃，空冷	未处理	1.2	HGH1015	20	696 ~ 706	98	—	—
				1.5	HGH1015	20	782 ~ 789	100	—	—
						900	174 ~ 186	92	51	152
					HGH3044	20	775 ~ 878	100	—	—
						900	202 ~ 227	100	—	—
	自动	1 140 ~ 1 170℃，空冷	未处理	1.5	HGH1015	20	727 ~ 748	97 ~ 98	—	—
						550	562 ~ 602	98 ~ 100	—	—
						700	468 ~ 490	99 ~ 100	—	—
						800	318 ~ 326	97 ~ 98	—	—
						900	211 ~ 212	100	51	136 ~ 168
			1 150℃，空冷	1.5	HGH1015	20	713 ~ 730	100	—	—
						550	541 ~ 572	100	—	—
						700	458 ~ 466	96	—	—
						800	279 ~ 311	97	—	—
						900	168 ~ 183	96	57	85
			未处理	1.5	不加焊丝	20	711 ~ 736	100	—	—
						900	188 ~ 221	100	—	—
GH1016	手工	供应状态	未处理	1.5	HGH1016	20	852	100	—	—
						900	211	97	61	85
					HGH3044	20	850	100	—	—
						900	217	99	61	71

续表 4.6-12

合金牌号	焊接方法	焊前处理	焊后处理	母材规格/mm	焊丝牌号	试验温度/℃	接头拉伸性能		接头持久性能	
							σ_b/MPa	强度系数/%	σ/MPa	t/h
GH1016	自动	供应状态	1 150℃，空冷	1.5	HGH1016	20	785～821	95～96	—	—
						700	506～525	86～99	—	—
						800	339～370	88～100	—	—
						900	208～213	97～100	51	222
									61	88
GH1035	自动	供应状态	未处理	1.5	HGH1035	20	672	100	—	—
						500	559	95	—	—
						700	378	90	—	—
						800	299	98	—	—
					HGH3044	20	639	88.2	—	—
					不加焊丝	20	624	86	—	—
				2.0	HGH3044	20	663	91.4	—	—
GH1131	自动	—	—	—	—	20	841	—	—	—
						700	519	—	—	—
						800	356	—	—	—
						900	205	—	—	—
						1 000	107	—	—	—
			未处理	—	不加焊丝	900	—	—	51	172
			1 200，10 min 空冷	—	—	900	—	—	51	300
GH1140	手工	固溶	未处理	0.8～2.5	HGH1140	20	643～701	97～100	—	—
						800	240～279	99.5～100	80	86
						900	141	99	—	—
					HGH3113	20	681	100	—	—
						800	284	100	58.5	＞100
					HGH5356	20	688	100	—	—
						800	237	91	80	84
		—	550℃，1 000 h 时效	—	—	20	827	—	—	—
						700	445	—	—	—
						800	258	—	—	—
			700℃ 1 000 h 时效	—	—	20	759	—	—	—
						700	454	—	—	—
						800	312	—	—	—
			800℃，1 000 h 时效	—	—	20	643	—	—	—
						700	379	—	57	85
						800	245	—	—	—
	自动	固溶	未处理	0.8～1.5	HGH1140	20	697～718	100	—	—
				1.2～1.5	HGH1140	800	269～300	94～100	—	—
						900	186	100	—	—
				1.0～1.5	不加焊丝	20	650～691	95～100	—	—
				1.5	不加焊丝	800	275	96	—	—
	自动脉冲	固溶	未处理	1.5	HGH1140	20	707	100	—	—
						750	351	96	—	—



续表 4.6-12

合金牌号	焊接方法	焊前处理	焊后处理	母材规格/mm	焊丝牌号	试验温度/℃	接头拉伸性能		接头持久性能	
							σ_b/MPa	强度系数/%	σ/MPa	t/h
GH1140	自动脉冲	固溶	未处理	1.5	不加焊丝	20	662	96	—	—
						750	350	95	—	—
GH2132	手工	—	未处理	1.5	HGH2132	20	602	—	—	—
			固溶时效	1.5	HGH2132	20	960	—	—	—
						650	710	—	588	> 100
	自动	—	固溶时效	1.5	HGH2132	20	916	—	—	—
						650	663	—	—	—
GH2150*	手工	固溶	未处理	2.5	GH533	20	844	—	—	—
						800	592	—	215	153
			固溶时效	2.5	GH533	20	1 049	—	—	—
						800	685	—	215	82
			未处理	1.5	GH2150	20	845	—	—	—
						700	740	—	490	91
			固溶时效	1.5	GH2150	20	1 245	—	—	—
						500	1 163	—	—	—
						600	1 087	—	—	—
						700	944	—	490	103
GH2302	手工	固溶	固溶时效	1.5	SG－1	20	1 227	96.3	—	—
						800	669	98.9	215	150 ~ 162
GH909*	手工	固溶时效	时效	3.0	HGH4169	650	774	93.6	—	—
		固溶	时效	3.0	HGH4169	650	811	98.1	—	—
GH3030	手工	固溶	未处理	1.0 ~ 1.5	HGH3030	20	688 ~ 760	100	—	—
						800	199	100	—	—
						900	88	—	—	—
	自动	固溶	未处理	1.5	不加焊丝	20	654	95	—	—
						700	397	98.7	—	—
GH3039	手工	固溶	未处理	1.5	HGH3039	20	794	98	—	—
						800	276	97	58.8	> 100
	自动	固溶	未处理	1.5	HGH3039	20	818	100	—	—
						800	346	92	58.8	100
GH3044	手工	1 200℃，空冷	未处理	1.5	HGH3044	20	763	98	—	—
						900	209	97	51	72 ~ 86
		1 140℃，空冷	1 200℃，空冷	1.5	HGH3044	900	230	99	51	72 ~ 94
	自动	固溶	未处理	1.5	不加焊丝	20	765	85	—	—
						600	602	85	—	—
						700	543	84	—	—
						800	468	89	—	—
						900	263	95	51	28 ~ 58
GH3128	手工	—	—	感应加电渣	GH3128	800	392	95	—	—
						950	186	94	39	141



续表 4.6-12

合金牌号	焊接方法	焊前处理	焊后处理	母材规格/mm	焊丝牌号	试验温度/℃	接头拉伸性能		接头持久性能	
							σ_b/MPa	强度系数/%	σ/MPa	t/h
GH3128	手工	—	—	感应加真空电弧	GH3128	20	755	—	—	—
						800	387	—	—	—
						900	240	—	—	—
						950	177	—	39	107 ~ 229
GH3536	手工*	供应状态	未处理	1.5	HGH3536	20	866	—	—	—
						650	570	—	294	189
						815	377	—	110	76
						900	241	—	59	64
					HGH3113	20	853	—	—	—
						650	612	—	294	237
						815	372	—	110	70
						900	233	—	59	100
	自动脉冲	供应状态	未处理	1.0	不加焊丝	20	842	100	—	—
						650	531	90	—	—
				1.5	SG-1	20	826	100	—	—
						650	581	98	294	296.5
GH3625*	手工	供应状态	未处理	0.8	SG-1	20	900	—	—	—
				1.1	SG-1	20	919	—	—	—
	自动	供应状态	未处理	0.8	不加焊丝	20	850	—	—	—
				1.1	不加焊丝	20	833	—	—	—
GH4099	手工	—	未处理	1.2	GH4099	20	919	86	—	—
						900	491	100	118	47.1
			固溶时效	1.2	GH4099	20	1 071	100	—	—
						900	490	100	118	59.8
GH4169	手工	—	固溶时效	—	HGH4169	20	1 260	—	—	—
						800	623	—	—	—
GH80A	自动	软态	固溶时效	1.2	不加焊丝	20	1 138 ~ 1 236	100	—	—
GH141	手工	—	未处理	—	GH141	20	980	92	—	—
						900	480	95	117	> 100
			固溶时效	—	GH141	20	1 250	98	—	—
						900	520	97	117	98
GH163	手工	固溶	时效	—	GH163	20	1 069	—	—	—
						700	863	—	402	138
						780	637	—	196	> 310
						850	412	—	103	166
						900	245	—	57	104
GH170	手工	—	未处理	1.6	GH170	20	970	100	—	—
						1 000	171	94	39	159
					不加焊丝	20	814	85	—	—
						1 000	166	89	39	148



续表 4.6-12

合金牌号	焊接方法	焊前处理	焊后处理	母材规格/mm	焊丝牌号	试验温度/℃	接头拉伸性能		接头持久性能	
							σ_b/MPa	强度系数/%	σ/MPa	t/h
GH652	—	固溶	未处理	1.5	HGH3044 GH652	20	785	—	—	—
						800	333	—	—	—
						900	118	—	—	—
GH5188*	手工	供应状态	未处理	0.8	GH5188	20	962	—	—	—
					GH605	20	983	—	—	—
	自动	供应状态	未处理	0.8	不加焊丝	20	938	—	—	—
GH605*	手工	供应状态	未处理	0.8	GH605	20	1 021	—	—	—
				1.1	GH605	20	1 099	—	—	—
	自动	供应状态	未处理	0.8	不加焊丝	20	800	—	—	—
				1.1	不加焊丝	20	1 061	—	—	—
GH1015 + GH3030	手工	—	—	1.5	HGH3030	20	757 ~ 760	—	—	—
						700	458 ~ 467	—	103	109 ~ 133
					HGH1015	20	746 ~ 762	—	—	—
						700	432 ~ 464	—	103	109 ~ 133
GH1015 + GH3039	手工	—	—	1.5	HGH3039	20	755 ~ 764	—	—	—
						800	317 ~ 323	—	59	353 ~ 503
					HGH1015	20	754 ~ 773	—	—	—
						800	314 ~ 321	—	59	353 ~ 503
GH1131 + GH3044	自动	—	未处理	—	—	20	751	—	—	—
						700	526	—	—	—
						800	343	—	—	—
						900	216	—	51	53
			1 200℃，空冷	—	不加焊丝	900	—	—	51	159
GH1131 + GH3039	自动	—	—	—	—	20	749	—	—	—
						800	307	—	—	—
GH1131 + GH1140	自动	—	—	—	—	20	682	—	—	—
						800	257	—	—	—
GH1131 + GH3030	自动	—	—	—	—	20	760	—	—	—
						700	366	—	—	—
GH1140 + GH3030	手工	—	—	—	HGH1140	20	678	—	—	—
						800	212	—	—	—
GH1140 + GH3039	手工	—	—	—	HGH1140	20	668	—	—	—
						800	267	—	—	—
GH1140 + GH3044	手工	—	—	—	HGH1140	20	660	—	—	—
						800	283	—	—	—
GH2150 + GH3030*	手工	供应状态	未处理	2.5	GH533	20	710	—	—	—
GH4099 + GH3030	手工	—	未处理	—	—	20	735	—	—	—
GH5188 + GH625*	手工	供应状态	未处理	0.8	GH5188	20	943	—	—	—
					SG－1	20	902	—	51	222
	自动	供应状态	未处理	0.8	不加焊丝	20	822	—	61	88

注：带＊数据引自北京航空材料研究院技术档案。



表 4.6-13 不同焊丝氩弧焊 GH1140 合金接头的抗氧化性能（静止空气中）

焊丝牌号	接头增重/Δg		接头腐蚀速度/g·(m^2·h)$^{-1}$	
	50 h	100 h	50 h	100 h
HGH3030	0.001 30	0.001 93	0.036 3	0.027 1
HGH3113	0.001 23	0.002 33	0.034 7	0.031 0
HGH3536	0.001 40	0.002 53	0.038 0	0.035 0
结论	三种焊丝所焊接头均属抗氧化级			

3.2 熔化极惰性气体保护电弧焊

3.2.1 焊接特点

固溶强化高温合金可用熔化极惰性气体保护电弧焊进行焊接，高 Al、Ti 含量的沉淀强化型高温合金和铸造高温合金因裂纹敏感性大，不推荐采用该焊接工艺。高温合金厚板（≥6 mm）构件宜采用熔化极惰性气体保护焊，焊接时熔滴可采用滴状过渡、短路过渡、喷射过渡和脉冲喷射过渡。考虑到高温合金因过热产生晶粒长大和热裂纹敏感性，建议采用脉冲喷射过渡形式。

焊前应对焊件进行固溶处理或过时效处理，焊后应及时消除焊接应力。

3.2.2 焊接材料

熔化极惰性气体保护焊焊丝应采用与母材相同或相近的成分，为避免形成结晶裂纹可选用抗裂性良好的 Ni－Cr－Mo 系焊丝，其成分见表 4.6-7 和表 4.6-8。焊丝直径取决于熔滴过渡形式和母材厚度。当采用脉冲喷射过渡形式时，焊丝直径可大一些，选用 ϕ1.0～1.6 mm。

保护气体可用纯氩气、氦气或氩氦混合气。气体流量大小取决于接头形式、熔滴过渡形式和焊接位置，一般在15～25 L/min 范围内。为减少飞溅和提高液态金属的流动性，推荐采用氩气中加入 15%～20%氦的混合气体。

3.2.3 接头形式

用熔化极气体保护电弧焊焊接高温合金时，要求坡口角度大，钝边高度小，根部间隙大。如带衬垫（环）的 V 形坡口，坡口角度 80°～90°，根部间隙 4～5 mm。U 形对接坡口，底部 R＝5～8 mm，坡口向外扩 15°，根部间隙 3～3.5 mm，钝边高度 2.2～2.5 mm。

3.2.4 焊接工艺

焊前清理同钨极气体保护电弧焊。装配定位应在夹具上进行，以保证装配质量。焊接工艺参数可参考表 4.6-14。

表 4.6-14 高温合金熔化极气体保护电弧焊工艺参数

母材厚度/mm	熔滴过渡形式	焊丝		保护气体	焊接位置	焊接电流/A	电弧电压/V	
		直径/mm	熔化速度/m·min^{-1}				平均	脉冲
6	喷射	1.6	5.0	氩	平焊	265	28～30	—
	脉冲喷射	1.1	3.6	氩或氦	立焊	90～120	20～22	44
	短路	0.9	6.8～7.4	氩或氦	立焊	120～130	16～18	—
3	短路	1.6	—	氩或氦	平焊	160	15	—
			4.7	氩或氦	平焊	175	15	—

在焊接过程中，应保持焊丝与焊缝呈 90°角的位置，以获得良好的保护和焊缝成形。焊接过程中应适当控制电弧长度，以减少飞溅。为防止未熔合和咬边，焊丝摆动于两端时可作短时停留。

3.2.5 接头性能

接头强度较高，接头强度系数可达 90%以上。

4 高温合金的高能束焊接

4.1 等离子弧焊

固溶强化和含 Al、Ti 低的时效强化高温合金可以用等离子弧焊方法进行焊接。可以焊接薄板也可以焊接厚板，可以填充焊丝也可以不加焊丝，均可以获得良好质量的焊缝。一般厚板采用小孔型等离子弧焊，薄板采用溶透型等离子弧焊，箔材用微束等离子弧焊，此外还有利用脉冲电流进行焊接的等离子弧焊。焊接电源采用陡降外特性的直流正极性，高频引弧，焊枪的加工和装配要求精度较高，并有很高的同心度。等离子气流和焊接电流均要求能递增和衰减控制。

焊接高温合金时，采用氩或氩中加适量氢气作保护气体和等离子气体，加氢可使电弧功率增大，提高焊接速度。氢气加入量不大于 15%，一般在 5%左右。焊接时是否填充焊丝根据需要确定。选用填充焊丝的牌号与钨极惰性气体保护焊的选用原则相同。

高温合金等离子弧焊时应注意控制焊接热输入。在焊接过程中，应控制焊接速度，速度过快会产生气孔，还应注意电极与压缩喷嘴的同心度。高温合金等离子弧焊接头力学性能较高，接头强度系数一般均大于 90%。表 4.6-15～表 4.6-17 列出了几种高温合金等离子弧焊的典型工艺参数，表中各符号意义如下：

I_h：焊接电流； U_h：电弧电压；
v_h：焊接速度； Q_1：等离子气体流量；
Q：气体流量； K_k：孔道比；
l_n：钨极内缩长度； D_z：喷嘴直径
I_j：基值电流； f：脉冲频率。

表 4.6-15 GH3039 和 GH2132 合金等离子弧焊工艺参数

合金牌号	板厚/mm	I_h/A	U_h/V	v_h/mm·min^{-1}	Q_1/L·min^{-1}	Q/L·min^{-1}	K_k	l_n/mm
GH3039	8.5	310	30	220	5.5	20	4.0/4.0	4.0
GH2132	7.0	300	—	200	4.5	25	3.0/2.8	3.0



表 4.6-16　GH1140 和 GH3536 合金平面对接自动微束等离子弧焊工艺参数

合金牌号	板厚/mm	I_h/A	v_h/mm·min^{-1}	Q_1/L·h^{-1}	Q/L·h^{-1}	D_r/mm	备注
GH1140	1.0	20	280	36	360Ar	1.2	筒体
GH3536	0.25	5.8	200	20	480Ar	0.75	—
	0.5	10	250	20	480Ar	0.75	—

表 4.6-17　GH1140 合金对接脉冲等离子弧焊工艺参数

板厚/mm	I_h/A	I_j/A	f/Hz	v_h/mm·min^{-1}	Q_1/L·h^{-1}	Q/L·h^{-1}	喷嘴/mm	
							孔径	孔道长
1.0	21	5	2.1	280	36	360	1.2	1.5

4.2　电子束焊

4.2.1　焊接特点

采用电子束焊可以成功地焊接固溶强化型高温合金，也可以焊接电弧焊难以焊接的沉淀强化型高温合金。其焊前状态最好是固溶状态或退火状态。对某些液化裂纹敏感的合金应采用小的热输入进行焊接。应调整焦距，防止或减少根部钉尖形缺陷的形成。

4.2.2　接头形式

电子束焊接接头可以采用对接、角接、端接、卷边接，也可采用丁字接、搭接及其他形式的接头。推荐采用平对接、锁底对接和带垫板对接形式。接头的对接端面不允许有裂纹、划伤、压伤及其他缺陷。边缘应去毛刺，保持棱角。端面加工的表面粗糙度为 $R \leqslant 3.2\ \mu m$。锁底对接的清根形式及尺寸见图 4.6-10。

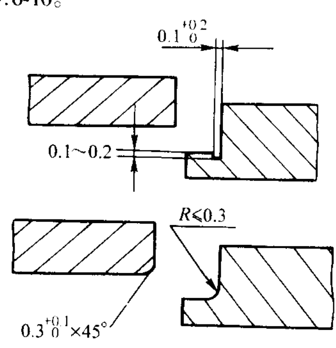


图 4.6-10　清根形式及尺寸图

4.2.3　焊前准备

有磁性的零件，焊前应去磁，使其磁通量密度不大于 2×10^{-4} T。有磁性的夹具及工作台也应焊前去磁。

焊前零件应仔细清理，表面不应有油污、油漆、氧化物、外来杂物等影响焊接质量或焊接过程的污染物质，经存放或运输的零件，焊前还需用于净绸布蘸丙酮擦拭待焊处的表面。零件装配应使接头紧密贴合和对齐，局部间隙不超过 0.08 mm 或 0.05δ，错位不大于 0.75 mm 或 0.1δ，均取其较小值（δ 为焊接厚度）。

采用压配合的锁底接头时，过盈量一般为 0.02～0.06 mm。

4.2.4　焊接工艺

装配好的焊接件首先应进行定位焊。定位焊点应合理布置，保证装配间隙不变。定位焊点应无焊接缺陷，且不影响电子束焊接。对冲压的薄板焊接件，定位焊更为重要，应布置紧密、对称、均匀。

焊接工艺参数根据母材牌号、厚度、接头形式和产品的技术要求确定，推荐采用低热输入和小焊接速度的工艺。表 4.6-18 和表 4.6-19 列出一些高温合金电子束焊的工艺参数。

表 4.6-18　GH907 及 GH907 与其他高温合金电子束焊接规范①

材料组合	厚度/mm	加速电压/kV	束流/mA	焊接速度/mm·s^{-1}
GH907	4.5	150	30	30
GH907 + GH4169	4.5 + 5.0	150	20	20
GH907 + GH141	4.5	150	18.4	20

① 引自北京航空材料研究院技术档案。

4.2.5　焊接缺陷及防止

高温合金电子束焊的焊接缺陷主要是热影响区的液化裂纹及焊缝中的气孔、未熔合等。热影响区的裂纹多垂直于熔合线向母材延伸。形成裂纹的几率与母材裂纹敏感性密切相关，与焊接工艺参数及焊件刚度也有关系。防止裂纹的措施：采用含杂质低的优质母材，减少晶界的低熔点相；采用较低的焊接热输入，防止热影响区晶粒长大和晶界局部液化；控制焊缝形状，减少应力集中；必要时填加抗裂性良好的焊丝。

电子束焊接头中的另一种主要缺陷是气孔，尤其是非穿透焊时根部形成长气孔（缩孔、冷隔、钉形缺陷）。气孔的形成与母材的纯净度、表面粗糙度、焊前清理等有关。防止气孔的措施：加强被焊零件的焊前检查，焊接端面附近不应有气孔、缩孔、夹杂等缺陷；提高焊接端面的加工精度；适当限制焊接速度；在允许的条件下，采用重复焊接的方法；采用"上焦点"焊接或"偏摆扫描焊"方法。未熔合和咬边缺陷主要是电子束偏离焊缝造成。防止措施有：保证零件表面与电子束轴线垂直；对工夹具进行退磁，防止残余磁性使电子束产生横向偏移，形成偏焊现象；调整电子束的聚焦位置。

电子束焊固有的焊缝下凹缺陷，可以采用双凸肩接头形式或填加焊丝的方法来弥补，在允许条件下，可用修饰焊方法进行修饰。

4.2.6　接头性能

电子束焊接高温合金的接头力学性能较高，表 4.6-20 列出几种高温合金电子束焊接头的拉伸性能和持久性能。

表 4.6-19　GH4169 和 GH5188 合金电子束焊的工艺参数

合金牌号	电子枪形式	焊机功率	接头形式	厚度/mm	工作距离/mm	束流/mA	加速电压/kV	焊接速度/m·min^{-1}	焊道数
GH4169	固定枪	60 kV，300 mA	对接	6.25	100	65	50	1.52	1
				32.00	82.5	350		1.20	1
GH5188	固定枪	150 kV，40 mA	锁底对接	0.76	152	22	100	1.00	1



表 4.6-20 高温合金电子束焊接头力学性能①

母材牌号	焊前状态	焊后状态	试验温度/℃	接头拉伸性能		接头持久性能	
				σ_b/MPa	δ_5/%	σ/MPa	t/h
GH4033	固溶	未处理	20	800	20.6	—	—
GH4169	固溶	未处理	20	845	38.3	—	—
			600	656	34.3	—	—
		双时效	20	1 348	18.9	—	—
			600	1 016	23.6	—	—
GH903	—	—	20	1 154	8.7	—	—
			650	860	6.6	490	15.5
						451	56
GH907*	固溶	双时效	20	1 054	8.3	—	—
			540	862	9.5	700②	64.5，68，63
	固溶+一级时效	双时效	20	1 038	9.5	—	—
			540	866	11.5	700②	71，65，82.3
	固溶+双时效	双时效	20	1 050	9.5	—	—
			540	866	11.8	700②	78，91.5，71
GH909*	固溶+一级时效	双时效	20	977	5.8	—	—
			650	791	20.0	338④	80④
	固溶	双时效	650	769	10.7	—	—
GH4169+GH907	固溶	未处理	20	801	29.7	—	—
			600	593	33.9	—	—
		按 GH4169 规范时效	20	1 083	9.98	—	—
			600	847	9.75	—	—
	固溶+时效	按 GH4169 规范时效	20	1 008	12.88	—	—
			600	789	13.8	—	—
		按 GH907 规范时效	20	994	13.2	—	—
			600	782	14.8	—	—
GH4169+GH907*	GH4169 固溶 GH907 固溶+一级时效	按 GH907 规范时效	20	1 087	6.7	—	—
			540	906	8.5	760③	74.5，72，63
		按 GH4169 规范时效	20	1 088	12.5	—	—
			540	902	11.8	760③	97，97.5，91
	固溶	按 GH4169 规范时效	20	1 119	7.2	—	—
			540	980	10.5	760③	96，69
GH907+GH141*	GH141 过时效 GH907 固溶+一级时效	固溶时效	20	1 100	7.0	—	—
			540	987	12.8	760③	128，117
		时效	20	1 020	11.5	—	—
			540	845	13.2	760③	69.5
	GH141 固溶退火 GH907 固溶+一级时效	时效	20	1 141	10.1	—	—
			540	910	14.5	760③	160.5，>200

① 带*者数据引自北京航空材料研究院技术档案。
② 700 MPa 拉伸 60 h 后，应力增至 760 MPa。
③ 76 MPa 拉伸 60 h 后，应力增至 825 MPa。
④ 起始应力为 338 MPa，23 h 后每 8 h 增加应力 24 MPa，拉伸 79 h 时，应力增至 530 MPa。

4.3 激光焊

激光焊可以焊接各类高温合金，包括电弧焊难以焊接的含高铝、钛的沉淀强化高温合金。目前已焊接了一些牌号的高温合金，如 GH4169、GH141、GH163、GH3536 等。用于焊接的激光发生器一般为 CO_2 连续或脉冲激光发生器，功率为 1～50 kW。

激光焊的保护气体，推荐采用氦气或氦气与少量氩的混



合气。虽然使用氦气成本高，但氦气可以抑制离子云，增加焊缝的熔深。高温合金激光焊的接头形式一般为对接和搭接接头。母材厚度可达 10 mm。接头制备的装配要求很高，与电子束焊相似。激光焊焊缝形状也与电子束焊相似。激光焊的主要参数是输出功率和焊接速度等，根据母材厚度和物理性能通过试验确定。

表 4.6-21 列出几种高温合金激光焊接头的力学性能。从表中可以看出，高温合金激光焊接头的力学性能较高，接头强度系数为 90% ~ 100%。

表 4.6-21 高温合金激光焊接头的力学性能

合金牌号	厚度/mm	状 态	试验温度/℃	接头拉伸性能			接头强度系数/%
				σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	
GH141	0.13	焊态	室温	859	552	16.0	99.0
			540	668	515	8.5	93.0
			760	685	593	2.5	91.0
			990	292	259	3.3	99.0
GH3030	1.0	焊态	室温	714	—	13.0	88.5
	2.0		室温	729	—	18.0	90.3
GH163	1.0	固溶+时效	室温	1 000	—	31.0	100
	2.0	固溶+时效	室温	973	—	23.0	98.5
GH4169	6.4	固溶+时效	室温	1 387	1 210	16.4	100

5 高温合金的电阻焊

5.1 电阻点焊

5.1.1 焊接特点

固溶强化和沉淀强化型高温合金具有较好的电阻点焊焊接性，采用控制工艺参数精度高、可提供大焊接压力的气压式固定焊机无需采取特殊措施即可以获得良好的接头。铸造高温合金不采用电阻点焊方法进行焊接。

高温合金的导电性和导热性差、线膨胀系数大、强度和硬度高、高温变形抗力大，因此电阻点焊时需采用小电流、中等长的焊接时间、大焊接压力的工艺参数，方可获得优质接头。

高温合金表面有化学性质稳定的氧化膜，在电阻点焊前需仔细去除，以防止形成结合线裂纹等缺陷。

5.1.2 焊接设备和电极

可采用单相交流点焊机和三相低频点焊机。焊机应能准确控制、并可在规定范围内调整焊接工艺参数。焊接时效强化高温合金和钴基高温合金推荐采用程序控制的高电极压力调幅焊机。

点焊用电极应采用耐热性好、软化点高、高温硬度大的铜合金，如钴铍铜合金、铬锆铜合金，也可采用铬铝镁铜合金。

点焊电极的工作面一般为平面，也可为球面形。电极工作面直径和球面电极的曲率半径根据零件厚度和对熔核尺寸的要求确定。

5.1.3 焊前准备

高温合金点焊前应彻底清除待焊表面上的氧化物、油污及其他外来杂物。为使接触表面有稳定的接触电阻并防止形成结合线深入裂纹，推荐采用酸洗方法。钴基合金不宜采用吹砂方法清除氧化物。

5.1.4 焊接工艺

高温合金焊接前状态应为固溶状态或退火状态。时效状态下点焊时，会产生飞溅和裂纹。点焊工艺参数应选择较小电流、中等长焊接时间和较大的电极压力。表 4.6-22 列出不同厚度板材的工艺参数以供参考。工艺参数选择合理时，应得到直径较大、焊透率偏小（40% ~ 50%）、无内部缺陷的熔核。点焊某些沉淀强化高温合金（如 GH141、GH4099 等）时建议采用可控电流递升和递减、且可加顶锻压力的焊机。高温合金点焊接头的组合总厚度一般不大于 5 mm，厚度比不大于 1:3。因为组合厚度较大时，一方面接头的疲劳性能下降，另一方面难以获得质量符合要求的焊点。

表 4.6-22 高温合金点焊的工艺参数

合金牌号	厚度/mm	焊前状态	电极直径/mm	焊接电流/A	焊接时间/s	电极压力/N	熔核	
							直径/mm	熔透率/%
GH1035	1.5	交货状态	5.0±1	6 700	0.12	6 960	4.5	66
	2.0	交货状态	5.0±1	7 200	0.12	7 355	4.8	70
GH1140	0.8	固溶	5.0	6 200 ~ 6 400	0.22 ~ 0.24	3 140 ~ 4 120	4.0 ~ 4.5	30 ~ 70
	1.0	固溶	5.0	6 200 ~ 6 500	0.26 ~ 0.30	4 120 ~ 4 905	4.2 ~ 4.7	40 ~ 70
	1.2	固溶	5.5 ~ 6.0	7 000 ~ 7 500	0.30 ~ 0.34	4 415 ~ 5 490	5.0 ~ 5.5	40 ~ 70
	1.5	固溶	6.5 ~ 7.0	8 300 ~ 8 800	0.38 ~ 0.44	5 100 ~ 6 375	6.0 ~ 6.3	40 ~ 70
	1.7	固溶	7.5	8 400 ~ 8 900	0.44 ~ 0.48	6 080 ~ 7 060	6.5 ~ 7.5	40 ~ 70
	2.0	固溶	8.0	9 200 ~ 9 400	0.44 ~ 0.50	7 060 ~ 8 040	7.0 ~ 8.0	40 ~ 70
	2.5	固溶	8.5	9 400 ~ 9 600	0.50 ~ 0.52	8 040 ~ 9 020	7.5 ~ 8.5	40 ~ 70

续表 4.6-22

合金牌号	厚度/mm	焊前状态	电极直径/mm	焊接电流/A	焊接时间/s	电极压力/N	熔核	
							直径/mm	熔透率/%
GH2150	1.0	—	5（上），6（下）	—	0.16~0.18	≥7 840	≥4.0	—
	1.5	—	6（上），7（下）	—	0.18~0.22	≥8 820	≥5.0	—
	2.0	—	6（上），7（下）	—	0.32~0.34	≥9 800	≥5.5	—
	2.5	—	6（上），7（下）	—	0.34~0.38	≥9 800	≥5.5	—
GH3030	1.0	固溶	4.0	6 000~6 500	0.24~0.26	4 600~5 000	3.5~4.0	40~70
	1.5	固溶	5.0	6 500~7 200	0.30~0.32	5 680~6 280	4.0~4.5	40~70
GH3039	1.3	固溶	6.5	7 000~7 500	0.26~0.28	4 905~5 259	5.0	—
GH3536	1.0	固溶	6（上），7（下）	—	0.24~0.28	4 000	—	—
	1.5	固溶	6（上），7（下）	—	0.34~0.38	6 250	—	—
GH4099	1.2	固溶	6.0~7.0	6 800~7 200	0.38~0.42	>7 800	5.5~6.5	40~70
	1.5	固溶	6.0~7.0	7 500~8 500	0.38~0.42	>8 800	5.4~6.5	40~70
GH3030+GH3039	1.0	固溶	5.0+1	5 000~6 000	0.34~0.38	4 510~4 905	5.0	—
GH3039+GH3044	1.2+1.5	固溶	5.0+1	6 000~6 500	0.32~0.36	4 705~5 100	5.0	—

异种高温合金组合点焊及与不锈钢等异种材料组合点焊，在工艺上无困难。选择合适的焊接工艺参数可获得质量符合要求的焊点。

5.1.5 焊接缺陷及防止

高温合金电阻点焊时，会产生气孔、缩孔、裂纹、结合线深入、烧穿、未完全熔合、压痕过深和喷溅等缺陷。其中裂纹、烧穿、熔核过小是产品上不允许出现的缺陷。其他缺陷依不同产品的质量要求，允许存在一定大小和数量，允许修补一定大小和数量的缺陷。具体规定参见各行业标准。

裂纹：高温合金点焊时，只要工艺参数合适，一般不会出现熔核内部裂纹和焊点表面裂纹。有时会产生与缩孔伴生的裂纹和结合线裂纹。某些高温合金凝固时体积收缩较大，会形成缩孔，有时沿缩孔的尖角处形成沿晶裂纹。调整工艺参数，加大电极压力，可以改善这种缺陷。结合线裂纹是由于结合面上存在氧化膜或夹杂物，在熔核凝固时发生聚集引起。该裂纹大多数具有穿晶性质。为消除该裂纹需对待焊表面进行彻底的清理（如先碱洗后酸洗或用金刚砂轮深抛光）去除氧化层和夹杂物。

未熔合和未完全熔合：指焊点未熔化形成塑性结合，或熔核过小（未达到规定的尺寸）。未熔合和未完全熔合直接减小焊点的承载能力，在产品中不允许存在。该缺陷主要是焊接过程不稳定造成的。其消除方法是改善焊件的表面质量，使表面有稳定的接触电阻；检修焊机，使焊机有稳定的电极压力和焊接电流；修复电头工作面，保持规定的尺寸。

烧穿：是由于焊件或焊件与电极之间存在绝缘物，形成局部导电，电流密度过大，造成焊件烧毁或形成孔洞。这种缺陷破坏了焊件的完整性，不允许存在。

气孔和缩孔：这种缺陷是由于合金凝固时有较大的体积收缩，而无足够大的压力条件形成的。缩孔和气孔对接头的静载强度无影响，一般允许小于25%d（d为熔核直径）的缩孔存在。

结合线深入：是指沿焊件贴合面伸入熔核的连续夹杂物或未熔合缝隙。它与焊前表面清理状态有很大关系。

喷溅：喷溅有内部和外部喷溅之分。内部喷溅是由于焊点熔核发展过快，超过塑性环而将液态金属喷出。外部喷溅是指电极与焊件表面之间熔化金属溢出的现象。喷溅是由于母材表面状态不良，电极不平，焊接工艺参数不合适造成的。只要合理调整各工艺环节，则可以避免。

5.1.6 接头组织及力学性能

点焊熔核为铸造组织，呈方向性强的柱状晶，树枝状晶之间有较大成分偏析，尤其熔核的中心部为低熔点组织，腐蚀后现出树枝晶界加粗状。焊点热影响区常出现“胡须”和“局部熔化”的特殊组织，也会引起晶界长大现象。“胡须”和“局部熔化”组织对接头静载力学性能无影响，因此不做缺陷处理。

接头的力学性能列于表4.6-23中。接头力学性能与熔核直径和母材性能有关。焊后进行固熔时效处理后，可在一定程度上提高接头抗剪强度。

表 4.6-23 高温合金点焊接头的力学性能

合金牌号	厚度/mm	试样状态	熔核直径/mm	试验温度/℃	破断力/kN·点$^{-1}$		(P_b/P_τ)/%
					抗剪力 P_τ	抗拉力 P_b	
GH1015	1.5	焊态	5.1~5.3	20	9.81	8.42	85
				900	4.34	—	—
GH1016	1.5	焊态	5.6	20	11.86	8.45	71
				900	3.80	—	—
GH1035	1.5	焊态	4.5	20	10.06	—	—
				700	8.08	—	—
				800	5.68	—	—
GH1140	1.5	焊态	6.0~7.0	20	12.38	11.75	94
				700	8.64	—	—
				800	6.67	—	—



续表 4.6-23

合金牌号	厚度/mm	试样状态	熔核直径/mm	试验温度/℃	破断力，/kN·点$^{-1}$		(P_b/P_τ)/%
					抗剪力 P_τ	抗拉力 P_b	
GH2132	1.5	焊态	5.0~5.5	20	12.25	—	—
GH2150	1.5	焊态	5.5	20	12.69	10.47	82
				800	10.84	—	—
		焊后固溶时效	5.5	20	16.09	7.65	47
				800	12.26	—	—
GH3030	1.5	焊态	4.2	20	11.46	—	—
GH3039	1.3	焊态	5.0	20	11.76	—	—
				700	6.58	—	—
				800	5.58	—	—
GH3044	1.5	焊态	4.5	20	9.50	9.96	100
				900	3.82	—	—
GH3128	1.2	焊态	3.7	20	7.84	—	—
GH3536	1.5	焊态	4.3~4.5	20	9.67	—	—
				650	6.59	—	—
				815	5.30	—	—
GH4099	1.2	焊态	5.3	20	11.15	10.32	92
				900	6.52	—	—
	1.2	焊后时效	5.3	20	12.87	7.41	57
				900	6.96	—	—
		焊后固溶时效	5.3	20	11.42	7.51	65
				900	6.84	—	—
GH141	1.6	焊态	5.5	20	13.03	—	—
GH145	0.8	焊态	4.3	20	5.12	—	—
			7.3	20	14.68	—	—
GH170	—	—	—	20	12.1	12.4	100
GH652	1.5	焊态	—	20	12.749	—	—
				900	3.432	—	—
GH1140 + GH3030	1.5	焊态	6.0~7.0	20	11.66	—	—
GH1140 + GH3039	1.5	焊态	6.0~7.0	20	12.23	—	—

5.2　电阻缝焊

5.2.1　设备及电极

电阻缝焊高温合金可以采用单相交流、三相低频或次级整流的焊机。焊机应能精确控制焊接电流、时间和压力。焊机应能提供大的电极压力。

电极滚轮可用铍钴铜合金、铬锆铜合金制成。滚轮型面可为平面或曲面。滚轮宽度和曲面的半径应根据焊件和焊核宽度要求而定。

5.2.2　焊接工艺

电阻缝焊的焊前表面准备与点焊的要求相同。

缝焊各类高温合金的工艺参数见表 4.6-24。

表 4.6-24　高温合金缝焊的工艺参数

合金牌号	厚度/mm	滚轮宽度/mm	焊接电流/A	焊接时间/s	休止时间/s	电极压力/N	焊速/m·min^{-1}
GH1015、GH1016	1.0	5~6	7 800	0.12~0.16	0.08~0.12	6 865	0.50~0.55
	1.2	5~6	8 000	0.14~0.18	0.10~0.14	7 845	0.45~0.50
	1.5	6~7	9 000	0.16~0.22	0.14~0.16	8 825	0.40~0.45
GH1016	0.8	5~6	7 600	0.10~0.12	0.08~0.12	5 885	0.50~0.55
	2.0	6~7	9 200	0.24~0.28	0.22~0.26	9 805	0.30~0.36



续表 4.6-24

合金牌号	厚度/mm	滚轮宽度/mm	焊接电流/A	焊接时间/s	休止时间/s	电极压力/N	焊速/m·min⁻¹
GH1035	1.5	5.0	6 800 ~ 7 200	0.18 ~ 0.22	0.54 ~ 0.64	6 765	0.16 ~ 0.20
	2.0	5.0	7 000 ~ 8 000	0.24 ~ 0.28	0.52 ~ 0.62	7 322	0.15 ~ 0.20
GH1131	—	6 + 1	—	0.24	0.18	5 885 ~ 7 355	0.42
GH1140	0.8	5.0（上），6.0（下）	6 800 ~ 7 200	0.08 ~ 0.12	0.08 ~ 0.10	4 905 ~ 5 885	0.5 ~ 0.6
	1.0	5.5（上），6.0（下）	6 800 ~ 7 300	0.10 ~ 0.12	0.10 ~ 0.12	5 885 ~ 7 160	0.4 ~ 0.5
	1.2	5.5（上），6.0（下）	7 600 ~ 8 000	0.14 ~ 0.16	0.10 ~ 0.12	5 885 ~ 7 355	0.4 ~ 0.5
	1.5	6.0（上），7.0（下）	7 800 ~ 8 200	0.16 ~ 0.18	0.14 ~ 0.16	7 160 ~ 8 240	0.3 ~ 0.4
	1.7	6.0（上），7.0（下）	8 600 ~ 9 000	0.18 ~ 0.22	0.14 ~ 0.18	7 255 ~ 9 020	0.3 ~ 0.4
	0.8 + 1.0	6.0（上），7.0（下）	6 800 ~ 7 000	0.14	0.18	4 905 ~ 5 395	0.6
	1.0 + 1.5	6.0（上），8.0（下）	7 600 ~ 8 000	0.14	0.16	6 865 ~ 7 355	0.5
	1.2 + 2.0	7.0（上），8.0（下）	7 800 ~ 8 500	0.22	0.22	7 845 ~ 8 335	0.45
GH2132	1.5	5.5（上），6.0（下）	8 300 ~ 9 500	0.16 ~ 0.18	0.16 ~ 0.18	7 650 ~ 8 335	0.36
	2.0	5.5（上），6.0（下）	10 000 ~ 12 000	0.18 ~ 0.22	0.24 ~ 0.28	8 335 ~ 9 805	0.36
GH2150	1.0	5.0（上），6.0（下）	—	0.16 ~ 0.18	0.18 ~ 0.22	6 800 ~ 7 800	0.35 ~ 0.45
	1.5	6.0（上），7.0（下）	—	0.18 ~ 0.22	0.22 ~ 0.26	≥8 800	0.30 ~ 0.40
	2.0，2.5	6.0（上），7.0（下）	—	0.32 ~ 0.36	0.34 ~ 0.38	≥9 800	0.20 ~ 0.30
	2.5 + 1.0	6.0（上），7.0（下）	—	0.22 ~ 0.24	0.24 ~ 0.28	≥8 800	0.30 ~ 0.40
GH3030	1.0	5.0	6 500	0.16	0.10	5 395	0.6
	1.3 + 1.4	4.0 ~ 5.0	6 600	0.12	0.10	6 375	0.4
	1.4 + 1.5	4.0~5.0（上），7.0（下）	6 800	0.12	0.10	6 965	0.4
	1.4 + 1.7	4.0~5.0（上），7.0（下）	7 500	0.16	0.14	6 965	0.4
	1.5 + 1.7	4.5 ~ 5.5	7 800	0.16	0.12	6 965	0.4
	1.5	5.5（上），5.0（下）	7 700	0.18	0.14	6 670	0.5
	1.7	4.5	8 000	0.16	0.14	6 965	0.4
GH3039	1.3	6.0 ~ 7.0	7 500 ~ 8 500	0.28 ~ 0.32	0.28 ~ 0.30	6 865 ~ 7 355	0.23
GH3044	1.2 + 1.5	6.0	5 600 ~ 6 000	0.18 ~ 0.24	0.16 ~ 0.22	6 865 ~ 7 355	0.35 ~ 0.35
	1.5	5 + 1	5 800 ~ 7 200	0.22 ~ 0.26	0.18 ~ 0.24	7 060 ~ 7 845	0.30 ~ 0.40
GH3128	1.5	—	9 800	0.28	0.24	6 375 ~ 7 845	0.34
GH5356	1.0	5.5（上），7.0（下）	—	0.14 ~ 0.18	0.14 ~ 0.22	2 500	0.34 ~ 0.40
	1.5	5.5（上），7.0（下）	—	0.16 ~ 0.20	0.14 ~ 0.22	2 500	0.22 ~ 0.34
GH4099	1.2	6.0（上），7.0（下）	7 500 ~ 8 200	0.16 ~ 0.18	0.14 ~ 0.18	>9 000	0.30 ~ 0.40
	1.5	6.0（上），7.0（下）	7 500 ~ 8 500	0.18 ~ 0.22	0.16 ~ 0.18	>9 000	0.30 ~ 0.45
GH80A	1.2	5.5（上），6.5（下）	—	脉冲格 15	休止格 15	8 728	0.15
GH3030 + GH3039	0.8 + 1.0	6.0 ~ 7.0	8 100 ~ 9 500	0.12 ~ 0.14	0.04 ~ 0.06	6 865 ~ 7 255	0.62 ~ 0.70
	1.5 + 1.0	6.0 ~ 7.0	8 400 ~ 9 400	0.14 ~ 0.16	0.04 ~ 0.10	6 865 ~ 7 255	0.48 ~ 0.70
GH3039 + GH1140	1.0 + 1.5	6.0 ~ 7.0	7 600 ~ 8 300	0.16 ~ 0.18	0.08 ~ 0.12	6 865 ~ 7 255	0.50 ~ 0.62

为防止形成裂纹、缩孔等缺陷，应选用大压力、长休止时间、低焊接速度的工艺规范。为保证焊缝的气密性，要求熔核之间重叠 1/3 以上。过大的重叠量会使接头组织恶化，增加缺陷。可以增大冷却水、采用大直径滚轮来提高接头的冷却速度，改善接头组织。缝焊的熔核宽度一般应为滚轮宽度的 90%以上。焊透率应为 15% ~ 35%。

5.2.3　接头力学性能

表 4.6-25 列出了各类高温合金缝焊接头的力学性能。固溶强化合金缝焊接头强度较高，强度系数均大于 85%，持久性能与母材技术条件要求值相近。时效强化合金的缝焊接头强度也较高，但其持久性能与对接的钨极惰性气体保护焊接头相比均较低。缝焊接头持久性能较低的原因主要是搭接接头熔核边缘在高温持久应力作用下，产生较大的应力集中所致。故高温下工作承受较大应力的沉淀强化合金焊接构件应考虑采用对接接头钨极惰性气体保护焊。

高温合金缝焊构件一般不要求进行焊后消除应力处理。沉淀强化合金焊后进行时效或固溶处理可提高接头的强度。



表 4.6-25　高温合金缝焊接头的力学性能

合金牌号	厚度 /mm	试样状态	试验温度/℃	拉伸性能		持久性能	
				σ_b/MPa	强度系数/%	σ/MPa	t/h
GH1015	1.5	焊态	20	730～763	98～99	—	—
			550	580	96	—	—
			700	471～490	98～100	—	—
			800	342～348	100	—	—
			900	188～194	96～98	51	139～166
		1 150℃空冷	20	682	100	—	—
			550	517	97	—	—
			700	433	94	—	—
			800	315	100	—	—
			900	185	100	61	90
GH1016	0.8～2.0	焊态	20	804～873	97～100	—	—
	1.5	焊态	700	531	100	—	—
			800	345～355	92～100	—	—
			900	208～221	99～100	51	226
						61	128
GH1035	1.5	焊态	20	677	—	—	—
			800	245	—	—	—
GH1131	1.5	焊态	20	817	—	—	—
			700	523	—	—	—
			800	348	—	—	—
			900	207	—	51	67
			1 000	113	—	—	—
		1 200℃，10 min 空冷	900	—	—	51	130
GH1140	0.8～1.7	焊态	20	679～696	100	—	—
			800	241～251	95～100	—	—
	1.5	550℃，1 000 h 时效	20	813	91	—	—
			700	469	93	—	—
			800	250	99	—	—
		700℃，1 000 h 时效	20	724	87	—	—
			700	409	89	—	—
			800	297	99	—	—
		800℃，1 000 h 时效	20	629	91	—	—
			700	361	98	—	—
			800	228	97	—	—
GH2132	1.5	焊态	20	940	—	—	—
			650	725	—	588	16
		固溶时效	650	—	—	588	19
GH2150	1.5	焊态	20	859	—	—	—
			700	719	—	—	—
		固溶时效	20	950	—	—	—
			700	812	—	490	4



续表 4.6-25

合金牌号	厚度/mm	试样状态	度验温度/℃	接伸性能		持久性能	
				σ_b/MPa	强度系数/%	σ/MPa	t/h
GH3030	1.0～1.7	焊态	20	702～818	100	—	—
			800	118	—	—	—
			900	88	—	—	—
GH3039	1.5	焊态	20	784	97	—	—
			800	703	85	—	—
GH3044	1.2+1.5	焊态	20	878	100	—	—
	1.5	焊态	20	820	100	—	—
			900	225	98	51	115
GH3128	1.5	焊态 母材熔炼工艺： 感应加电渣	800	402	98	—	—
			900	250	98	59	140
			950	206	100	39	142
			1 000	142	100	29	108
		焊态 母材熔炼工艺： 感应加真空电弧	20	730	—	—	—
			800	363	—	—	—
			900	265	—	39	146
			950	181	—	—	—
GH3536	1.5	焊态	20	763	96	—	—
			650	514	91	294	214
			815	325	100	110	48
GH3625	1.5	焊态 1 090±10℃空冷	20	920	100	—	—
			815	—	—	114	64
GH4099	1.2	焊态	20	942	88.1	—	—
			900	440	92.5	118	21
		900℃，4 h空冷	20	1 001	89.1	—	—
			800	603	8 504	—	—
			900	419	94.2	118	20
		1 140℃，10 min空冷 +900℃，4 h空冷	20	952	85.1	—	—
			800	614	88.1	—	—
			900	403	91.3	118	29
GH80A	1.2	固熔时效	20	950～1 080	85	—	—
GH141	1.5	固溶时效	20	1 090	86	—	—
			900	482	90	117	36
GH163	1.5	固溶时效	20	1 010	—	—	—
			700	794	—	—	—
			800	—	—	177	200
			900	211	—	—	—
GH170	1.6	1 230，10 min空冷	20	828	88	—	—
			1 000	156	89	39	113
GH652	1.5	焊态	20	735	—	—	—
			800	216	—	—	—
			900	118	—	—	—



续表 4.6-25

合金牌号	厚度/mm	试样状态	试验温度/℃	拉伸性能		持久性能	
				σ_b/MPa	强度系数/%	σ/MPa	t/h
GH605	1.5	焊态	20	1 130	—	—	—
			815	—	—	165	6
GH3030 + GH3039	1.5	固溶时效	20	759	—	—	—
GH3030 + GH3044	1.5	固溶时效	20	749	—	—	—
GH3030 + GH1131	—	焊态	20	849	—	—	—
GH3030 + GH1140	1.5	焊态	20	697	—	—	—
			800	207	—	—	—
GH3039 + GH3044	1.5	固溶时效	20	825	—	—	—
GH3039 + GH1131	—	焊态	20	870	—	—	—
			800	321	—	—	—
GH3039 + GH1140	1.5	焊态	20	661	—	—	—
GH3044 + GH1131	—	焊态	20	853	—	—	—
			700	494	—	—	—
			800	348	—	—	—
			900	206	—	51	30
			1 000	98	—	—	—
		1 200℃，10 min 空冷	900	—	—	51	197
GH3044 + GH3128	1.5	焊态	800	417	—	—	—
			900	245	—	—	—
			950	147	—	—	—
GH1131 + GH1140	—	焊态	20	724	—	—	—
			800	265	—	—	—

5.3　闪光焊

高温合金可采用闪光焊连接。焊件一般为棒材、管材和型材以及挤压件对接。用于高温合金闪光焊的设备应具有较大的顶锻力，可准确调节各焊接参数和自动控制焊接循环。电极夹头材料常采用导电性好、硬度高的铜合金制成，内部通水冷却。

闪光焊的主要工艺参数是闪光留量、顶锻留量、闪光时间和顶锻时间、闪光电流、闪光速度及顶锻力等。高温合金闪光焊时，应采用适宜的闪光电流和闪光时间，较大的顶锻留量及顶锻力。焊接时注意防止接头过热产生晶粒长大。GH145 镍基高温合金的闪光焊工艺参数见表 4.6-26。

高温合金闪光焊的接头强度较高，接头强度系数一般可达到 90% 以上。表 4.6-27 列出了 GH4169 和 GH141 镍基高温合金闪光焊的接头力学性能。

表 4.6-26　GH145 镍基高温合金板材闪光焊工艺参数

截面尺寸/mm × mm	电极夹具距离/mm		闪光留量/mm	顶锻留量/mm	闪光时间/s	顶锻时间/s	加热电压/V
	初始	终了					
12.7 × 165.0	87.0	32.0	20.5	35.0	18	0.66	5.80
38.0 × 152.4	112.0	38.0	27.0	41.5	25	1.20	8.17

表 4.6-27　GH4169 和 GH141 镍基高温合金闪光焊接头的力学性能

合金牌号	棒材直径/mm	试样状态		试验温度/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	接头强度系数/%
		焊前	焊后					
GH4169	16.0	926℃退火	926℃1 h 空冷 + 718℃16 h 空冷	20	1 245	992	19	—
				537	1 060	861	19	—
				648	992	868	16	—
				760	655	527	14	—
GH141	12.8	1 080℃固溶	1 080℃固溶 + 760℃16 h 时效	20	1 220	854	13	93

6 摩擦焊

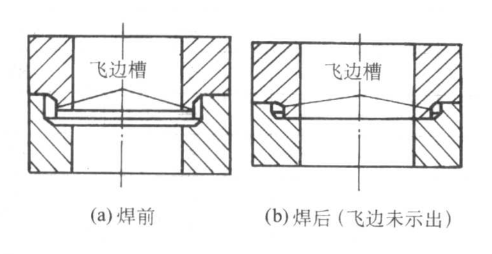
6.1 焊接特点

摩擦焊是一种优质高效、再现性好的固态焊接方法。摩擦焊有连续驱动、惯性和线性等方式。目前高温合金多采用惯性摩擦焊。它几乎可以焊接各种高温合金（包括粉末冶金高温合金、ODS合金等），也可以焊接高温合金同其他金属的异种材料接头。

高温合金具有导热性差，高温变形抗力大的特点，因此，惯性摩擦焊接高温合金时，应采用大惯量、低转速、大压力的工艺，应选用大功率、大轴向顶锻力的焊机。

6.2 接头设计

惯性摩擦焊的接头形式多为棒－棒、管－管、管－棒的对接。同质合金焊接时对接棒或管接头可设计为同直径的构件。当合金在锻造温度下的强度和热导率相差较大时，有必要调整两焊件结合面的比例，必要时比例通过试验确定。当焊接管子时，如果不允许存在内部飞边，而且产生的飞边不易去除时，应设计飞槽，如图4.6-11所示。



(a) 焊前　(b) 焊后（飞边未示出）

图 4.6-11　对接管接头的飞边槽

6.3 焊前准备

由于焊件原始表面层在摩擦焊过程中会被挤出，形成飞边，结合面为纯结的金属，所以接头表面的制备和清洗要求不严格，一般要求去除氧化物、油污以及外来物即可，但应准确计算和确定毛坯预留变形量；应采取措施保证焊件的同心度和防止变形，如棒件中心凸起的设计。图4.6-12为典型的棒中心凸起的设计。

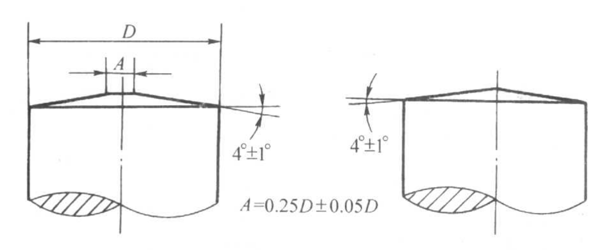


图 4.6-12　典型棒中心凸起的设计

6.4 焊接工艺

正确选择摩擦焊工艺参数十分重要，它关系到接头成形和焊接质量。应根据母材特性、焊机和生产条件的特点经试验优化选择。连续驱动摩擦焊的工艺参数较多，主要有主轴转速、摩擦力、顶锻力、摩擦时间、顶锻时间、制动时间等。其中摩擦力和顶锻力对焊接质量影响最大；摩擦力很大程度上决定了烧化速率和烧化量；顶锻力很大程度上决定了变形速率和变形量；摩擦力和转速决定了焊件的加热状态，因此对这几个参数应认真选择。惯性摩擦焊主要有惯量、转速和压力三个参数。这三个参数较容易控制，因此只要参数选择正确，接头质量稳定，再现性很好。对高温合金要求采用大惯量、低转速、大压力的工艺参数，焊接面积越大，所需惯量和压力越大，从而焊接设备就变得十分庞大。

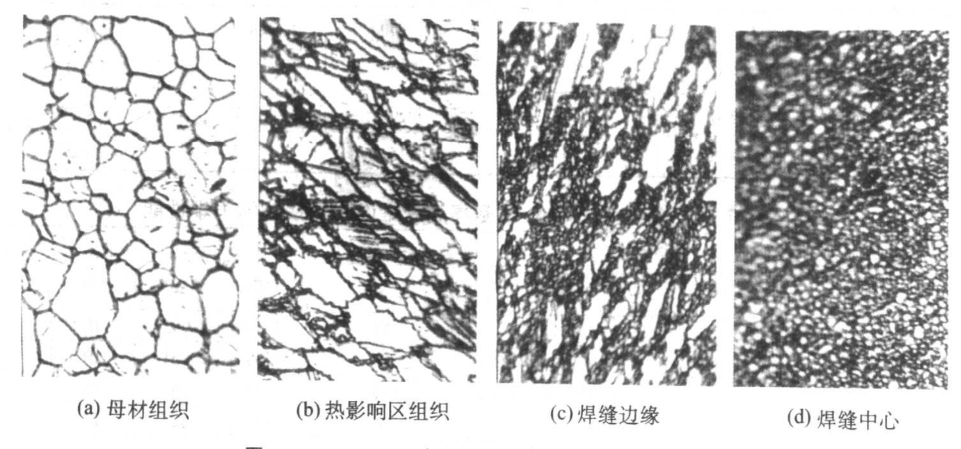
6.5 接头缺陷及防止

摩擦焊是靠焊接面间的摩擦热使金属达到高塑性状态，并在压力作用下发生塑性变形，将原焊接面金属层挤出，新的纯洁的金属紧密结合，形成焊接接头。因此摩擦焊接头中焊接缺陷较少。有时可能出现裂纹、未熔合和夹杂等缺陷。裂纹一般是由于加热程度不够，在大的顶锻压力下产生大的变形而造成。可以通过合理调节参数使焊接过程中有一个稳定的摩擦加热阶段来防止。未熔合（一般在棒心位置）和夹杂物主要是由于变形量不够，污物未被挤出造成。

6.6 接头组织与力学性能

图4.6-13示出GH4169合金摩擦焊接头组织。由图可看出焊缝中心为完全再结晶的等轴细晶奥氏体组织，并有随机分布的NbC相。焊缝边缘为不完全再结晶组织。热影响区为带有沿摩擦旋转方向伸长的奥氏体组织，并有较多孪晶。当焊前为固溶时效或直接双时效（DA）状态时，焊缝中心因温度较高，合金的强化相 γ'、γ'' 均溶解，δ相也会消失，在焊缝边缘和热影响区中可以保留这些强化相。焊缝中有大量位错缠结和多系滑移。由于焊缝中强化相固溶进基体，形成一个大约0.2 mm厚的弱带，影响接头性能。

高温合金摩擦焊接头的力学性能较高，几乎等于母材的水平。表4.6-28列出几种高温合金摩擦焊接头的力学性能。



(a) 母材组织　(b) 热影响区组织　(c) 焊缝边缘　(d) 焊缝中心

图 4.6-13　GH4169合金惯性摩擦焊接头组织（×800）



表 4.6-28　几种高温合金摩擦焊接头的力学性能

焊接方式	合金牌号	试样状态	试验温度/℃	拉伸性能				持久性能		接头强度系数/%	断裂位置
				σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%	σ/MPa	t/h		
连续驱动	GH3536	焊后固溶	20	725	—	46	53	—	—	100	母材
			815	362	—	39	46	103	124	100	母材
	GH4169	焊后固溶时效	20	1 330	—	9.4	25	—	—	100	母材
			650	1 130		11.7	27.8	690	62	100	母材
惯性摩擦焊	GH4169	焊前固溶时效 焊后时效	20	1 276	1 083	7.0	38.7	—	—	95	—
			650	1 103	987	6.8	26.8	690	71	90	—
		焊前 DA 焊后未处理	20	1 360	1 139	8.0	35.7	—	—	95	—
			650	1 138	969	10.2	25.2	700	48.75	97	—
		焊前锻态 焊后时效	20	1 442	1 302	18.1	45	—	—	100	—
			650	1 224	1 075	10.2	20	700	106	100	—
	GH710	焊后固溶时效	20	1 300	930	13.0	—	—	—	100	母材
			760	990	860	15.0	—	—	—	—	母材
	GH738	焊后固溶时效	20	1 290	940	20.0	—	—	—	100	母材
			430	1 130	760	17.0	—	—	—	—	母材

7　高温合金的钎焊和扩散焊

7.1　钎焊

7.1.1　钎焊特点

钎焊方法适用于所有高温合金包括熔焊焊接性差的铸造高温合金、镍铝金属间化合物基高温合金等的连接，还特别适用于复杂构件如发动机叶片等的焊接。

高温合金含有较多的 Cr，加热时表面形成稳定的 Cr_2O_3，比较难以去除；此外，镍基高温合金通常含 Al、Ti，尤其是沉淀强化高温合金和铸造高温合金的 Al、Ti 含量更高。铝、钛对氧的亲和力比铬大得多，加热时极易氧化。如何防止或减少高温合金加热时的氧化和去除其氧化膜是高温合金钎焊时的首要问题。因此高温合金一般采用真空钎焊或保护气氛炉中钎焊的工艺。

高温合金钎焊时，钎焊热循环应尽可能与母材的热处理制度相匹配，对于焊后要进行固溶时效处理的钎焊构件，钎焊温度不能过低，否则在焊后固溶处理时，钎焊缝会发生过分的重熔而流失甚至失效；对于焊后不再进行热处理的钎焊构件，应避免采用高温长时间保温的钎焊规范，以避免母材中的强化相聚集长大，降低母材的力学性能。此外，钎焊温度不应高于母材的固溶处理温度，否则会使母材晶粒长大，不利于母材性能。

由于高温合金焊件多用于高温条件下，有时还要承受大的应力，为适应这种使用条件，改善钎焊接头组织，提高接头重熔温度和力学性能，往往在钎焊后需进行扩散处理。

一些镍基高温合金，特别是沉淀强化合金有应力开裂的倾向，钎焊前必须充分去除加工过程中形成的应力，钎焊时应尽量减小热应力，使应力开裂的可能性降到最低限度。

7.1.2　钎料

(1) 镍基钎料和钴基钎料

镍基钎料是高温合金钎焊应用最多也是最重要的钎料。因为镍基钎料具有优良的高温性能和钎焊工艺性能，其熔点与大多数高温合金的热处理制度相匹配，钎焊时也不会发生应力开裂。国内已有一系列的标准镍基钎料。钴基钎料与镍基钎料一样，具有优异的高温性能和钎焊工艺性能，但由于钴资源缺乏，钴基钎料的应用受到限制，目前国内还无标准的钴基钎料。表 4.6-29 列出了常用镍基和钴基钎料的化学成分和钎焊温度。

BNi74CrSiB 钎料含铬量高，钎焊时硼和碳向母材扩散，可以使钎缝的重熔温度提高，它具有很好的高温性能，用于高温下受大应力的部件。

BNi75CrSiB 钎料的熔化温度比 BNi74CrSiB 钎料高，流动性较差。但因含碳量低，可减少碳向母材的扩散，钎料与母材的作用程度减弱，可钎焊稍薄一些的工件。BNi75CrSiB 钎料钎焊接头具有良好的高温性能，用途与 BNi74CrSiB 钎料相似。

BNi82CrSiB 钎料的熔化温度比上述两种钎料都低，可在较低温度下钎焊，钎料与母材的作用程度减弱，可钎焊较薄的工件。钎料的熔化温度区间小，具有良好的流动性。是应用较广的一种镍基钎料。由于钎料的含铬量低，钎焊接头的抗氧化性比 BNi75CrSiB 钎料钎焊的差。

BNi92SiB 钎料的流动性很好，流入和填充接头间隙的能力强，适宜于钎焊搭接量较大的接头。钎焊接头的耐热性比含铬的钎料差。

BNi93SiB 钎料含硅和硼的量比 BNi92SiB 低，熔化温度有所提高，结晶区间也增大，钎料流动性下降，但钎料的硬度有所改善，因此适用于要求钎缝圆角较大，或者要求钎焊后进行加工的零件。同时由于硼量的降低，钎料与母材的相互作用明显减弱，可用来钎焊比较薄的结构部件。



表 4.6-29 镍基钎料和钴基钎料的化学成分和性能

国标或航标牌号[①]	其他牌号	化学成分（质量分数）/%											熔化温度/℃	钎焊温度/℃
		Ni	Cr	Si	B	Fe	C	P	W	Mn	Cu	Co		
BNi74CrSiB	BNi-1	余量	13.0~15.0	4.0~5.0	2.75~3.50	4.0~5.0	0.60~0.90	≤0.02	—	—	—	—	975~1 040	1 065~1 205
BNi75CrSiB	BNi-1a	余量	13.0~15.0	4.0~5.0	2.75~3.50	4.0~5.0	≤0.06	≤0.02	—	—	—	—	970~1 075	1 075~1 205
BNi82CrSiB	BNi-2	余量	6.0~8.0	4.0~5.0	2.75~3.50	2.5~3.5	≤0.06	≤0.02	—	—	—	—	970~1 000	1 010~1 175
BNi68WCrSiB	171	余量	9.5~10.5	3.0~4.0	2.20~2.80	3.0~4.0	0.30~0.50	≤0.02	11.5~12.5	—	—	—	970~1 095	1 150~1 205
BNi92SiB	BNi-3	余量	—	4.0~5.0	2.75~3.50	≤0.5	≤0.06	≤0.02	—	—	—	—	980~1 040	1 010~1 175
BN93SiB	BNi-4	余量	—	3.0~4.0	1.50~2.20	≤1.5	≤0.06	≤0.02	—	—	—	—	980~1 065	1 010~1 175
BNi71CrSi	BNi-5	余量	18.5~19.5	9.75~10.50	≤0.03	—	≤0.10	≤0.02	—	—	—	—	1 080~1 135	1 150~1 205
BNi89P	BNi-6	余量	—	—	—	—	≤0.10	10.0~12.0	—	—	—	—	875	925~1 025
BNi76CrP	BNi-7	余量	13.5~15.0	≤0.10	≤0.01	≤0.20	≤0.08	9.7~10.5	—	≤0.04	—	—	890	925~1 040
BNi66MnSiCu	BNi-8	余量	—	6.0~8.0	—	—	≤0.10	≤0.02	—	21.0~24.5	4.0~5.0	—	980~1 010	1 010~1 095
HBNi89SiB	—	余量	—	8.0~9.0	1.7~2.2	—	≤0.06	≤0.02	—	—	—	—	980~1 000	1 040~1 100
HBNi75CrSiBCo	AMDRY915	余量	12.0~14.0	3.0~5.0	2.75~3.50	4.0~5.0	≤0.06	≤0.02	—	—	—	0.2~1.0	950~1 060	1 135~1 175
HBNi80CrSIB	160	余量	10.0~12.0	3.0~4.0	2.0~2.5	3.0~4.0	0.5	≤0.02	—	—	—	—	970~1 160	1 150~1 200
—	150	余量	15.0	—	3.5	—	0.10	—	—	—	—	—	1 055	1 065~1 200
—	170	余量	12.0	3.5	2.5	3.5	0.50	—	16.0	—	—	—	970~1 105	1 150~1 200
—	180	余量	5.0	3.00	1.0	3.50	0.25	—	—	—	—	—	970~1 180	1 175~1 230
—	200	余量	7.0	4.50	3.2	3.0	—	—	6.0	—	—	—	975~1 040	1 065~1 175
—	HLNi-2	余量	15.0~17.0	4.5~5.0	1.00~1.80	2.0~4.0	<0.10	Mo2.5~3.5	Ce0.1~0.15	Nb≤1.0	—	—	960~1 110	1 080~1 200
—	HL701	余量	14.0~18.0	3.5~5.5	3.0~4.5	≤5	—	—	—	—	—	—	970~1 070	1 120
—	GHL-6-2	余量	8.0~10.0	5.5~7.0	2.00~2.40	5.0~7.0	<0.10	Al<0.5	—	—	—	—	1 000~1 080	1 100
—	QNi-8	余量	14.0	4.5	3.25	4.5	<0.10	—	—	—	—	—	—	1 110~1 150
—	BCo-1	17.0	19.0	8.0	0.8	—	0.40	—	4.0	—	—	余量	1 105~1 150	1 150~1 230
—	300	17.0	21.0	3.25	3.0	—	0.8	—	10.0	—	—	余量	1 040~1 120	1 175~1 230

① GB10859-1989 镍基钎料；HB 6772—1993 镍基钎料。



表 4.6-30　高温合金钎焊用银基、铜基、锰基及贵金属钎料的化学成分和性能

钎料牌号	类别	化学成分（质量分数）/%									熔化温度/℃	钎焊温度/℃
		Ag	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	B	Si	其他		
BAg45CuZnCd	银基	44.0 ~ 46.0	14.0 ~ 16.0	14.0 ~ 18.0	—	—	—	—	—	Cd 23.0 ~ 25.0	620	620 ~ 760
BAg56CuZnSn	银基	55.0 ~ 57.0	21.0 ~ 23.0	15.0 ~ 19.0	—	—	—	—	—	Sn 4.5 ~ 5.5	620 ~ 650	650 ~ 760
BAg50CuZnSnNi	银基	49.0 ~ 51.0	20.5 ~ 22.5	26.0 ~ 28.0	0.30 ~ 0.65	—	—	—	—	Sn 0.7 ~ 1.3	650 ~ 670	670 ~ 770
BAg40CuZnSnNi	银基	39.0 ~ 41.0	24.0 ~ 26.0	29.5 ~ 31.5	1.30 ~ 1.65	—	—	—	—	Sn 2.7 ~ 3.3	634 ~ 640	640 ~ 740
BAg72CuNiLi	银基	71.0 ~ 73.0	余量	—	0.8 ~ 1.2	—	—	—	—	Li 0.40 ~ 0.60	780 ~ 800	800 ~ 850
Ag56CuMnNi	银基	余量	24.5 ~ 26.5		2.6 ~ 3.4	4.0 ~ 5.0	—	—	—	Li0.45 ~ 0.60	—	870 ~ 910
BCu	纯铜	≥99.90	—	—	—	—	—	—	—	—	1 083	1 100 ~ 1 150
Cu60NiSiB（HL－4）	铜基	—	余量	—	27.0 ~ 30.0	—	—	≤0.2	1.5 ~ 2.0	Al + Be≤0.1	1 122 ~ 1 166	1 180 ~ 1 200
Cu58NiMnCo（HLCu－2）	铜基	—	余量	—	17.0 ~ 19.0	6.0 ~ 7.0	4.5 ~ 5.5	0.15 ~ 0.25	1.6 ~ 1.9	Fe 0.8 ~ 1.2	1 027 ~ 1 070	1 080 ~ 1 100
Cu60NiMnCo（HLCu－2a）	铜基	—	余量	—	17.0 ~ 19.0	4.5 ~ 5.5	4.5 ~ 5.5	0.15 ~ 0.25	1.6 ~ 1.9	Fe 0.8 ~ 1.2	1 053 ~ 1 084	1 090 ~ 1 110
Cu－31.5Mn－1.0Co	铜基	—	余量	—	—	31.5	1.0	—	—	—	—	~ 1 000
BMn50NiCuCrCo	锰基	—	12.5 ~ 14.5	—	26.5 ~ 28.5	余量	4.0 ~ 5.0	—	—	Cr 4.0 ~ 5.0	1 010 ~ 1 035	~ 1 080
Mn64NiCrB（Mn－7）	锰基	—	—	—	16.0	余量	—	1.0	—	Cr16.0，Fe3.0	966 ~ 1 024	1 040 ~ 1 060
Au80Cu	金基	—	19.5 ~ 20.5	—	—	—	—	—	—	Au 余量	910	—
Au82Ni	金基	—	—	—	17.0 ~ 18.0	—	—	—	—	Au 余量	950	—
Ag54PdCu（SCP4）	含钯	54.0	21.0	—	—	—	—	—	—	Pd25.0	900 ~ 950	955
Ag75PdMn（SPM1）	含钯	75.0	—	—	—	5.0	—	—	—	Pd20.0	1 000 ~ 1 120	1 120
SMP2	含钯	64.0	—	—	—	3.0	—	—	—	Pd33.0	1 180 ~ 1 200	1 220
Ni48MnPd（NMP1）	含钯	—	—	—	48.0	31.0	—	—	—	Pd21.0	1 120	1 125



BNi71CrSi钎料不含硼，同母材的作用大大减弱，适宜于钎焊薄件。由于钎料的含铬量高，接头的高温强度和抗氧化性均与BNi74CrSiB钎料钎焊的接头相当。用该钎料钎焊时的钎焊温度很高。此外，由于BNi71CrSi钎料不含硼，特别适用于核领域。

BNi89P和BNi76CrP是镍基钎料中熔化温度最低的两种钎料，属于共晶成分，流动性极好，能流入紧密接触的接头，钎料对母材的溶蚀作用小。BNi76CrP钎料因含较多的铬，其耐热性比BNi89P钎料好。但这两种钎料的高温性能比Ni-Cr-B-Si和Ni-B-Si系钎料差得多，主要用来钎焊薄件。因钎料不含硼，也特别适用于核领域。

BNi68WCrSiB钎料同Ni-Cr-Si-B系钎料相比，含硼量降低到2.5%（质量分数），含钨量高达12%（质量分数），降低含硼量可减少硼对母材的晶间渗入，即减弱钎料同母材的反应，而钨可强化钎料，提高钎料的高温强度。由于硼含量的降低和钨的加入，钎料的熔化温度区间增大，流动性变差，可以填满宽达0.2 mm的间隙，是钎焊高温工作的部件和涡轮叶片补钎时常用的钎料。170钎料的含钨量更提高到16%（质量分数），钎料的流动性进一步降低，能够填充宽达0.4 mm的间隙。这两种钎料特别适用于在高温下工作的工件，间隙不易控制或者间隙较大的接头，也适用于钎焊铸造高温合金。

150钎料为Ni-Cr-B共晶成分，其脆性较Ni-Cr-Si-B系钎料低。这种钎料可用来钎焊涡轮叶片、喷气发动机部件和其他受力较大的部件。

160钎料的含硼、硅量比较低，因此钎料的硬度较低，钎焊接头的加工性能得到改善。但钎料的结晶温度区间增大，流动性差，可用来钎焊比较宽的间隙，同时可形成较大的钎缝圆角。

180钎料含硼量很低，只有1%（质量分数），使钎料同母材的反应减弱，即硼的晶间渗入进一步减小，但钎料的结晶温度区间也变得很大，是镍基钎料中熔化温度区间最大的一种。其流动性差，可以填充宽达0.65 mm的间隙，特别适用于钎焊间隙大或者不等间隙的接头，同时形成较大的钎缝圆角。

200钎料是在BNi82CrSiB钎料基础上加入6%（质量分数）的钨，钎料的液相线提高不多，但钎焊接头比用BNi-82CrSiB钎料钎焊的接头具有更好的高温持久性能。

钴基钎料具有特别好的高温性能，适用于要求高温持久性能较高接头的钎焊。目前国内尚无标准的钴基钎料，国外有BCo1（210）和300两种，主要钎焊钴基高温合金。

镍基钎料和钴基钎料含有较多的B、Si或P元素，组织中含有大量脆性化合物相，使钎料变形能力较差，无法进行塑性变形加工。因此通常以粉末、黏带和非晶态箔带形式使用。粉末状钎料使用时需加入有机黏结剂制成膏状使用或直接涂敷在钎焊接头处。黏带钎料是用粉末钎料和有机黏结剂调和，再轧制成黏带。非晶态箔是将熔融状态的钎料以10^6℃/s的冷却速度在水冷铜辊凝固，形成有一定韧性、成分均匀的钎料箔。黏带钎料和非晶态钎料均用于大面积钎焊，但非晶态钎料箔比黏带钎料和粉状钎料在工艺性能方面具有明显的优越性。

（2）银基钎料

当工件的工作温度不高时可采用银基钎料。用银基钎料钎焊固溶强化镍基高温合金时，钎焊温度对母材性能不产生任何影响，可以选用的钎料种类比较多，但从应力开裂的角度出发，以采用熔化温度较低的钎料为宜，如BAGg45CuZnCd、BAg56CuZnSn、BAg50CuZnSnNi、BAg40CuZnSnNi等（见表4.6-30），以减少钎焊加热时形成的内应力。

用银基钎料钎焊沉淀强化镍基高温合金时，所选用钎料的钎焊温度不应超过母材的时效强化温度，以免母材发生过时效而降低其性能。例如，对GH4033和GH4169合金的钎焊温度分别不应超过700℃和720℃，即应选择熔化温度较低的钎料。另一种办法是先将合金固溶处理，再采用熔化温度稍高的钎料，如BAg72CuNiLi（见表4.6-30）钎料在高于合金的时效温度下钎焊，然后再进行时效处理，钎焊件就不会在时效加热过程中因钎料的熔化而发生错位。

（3）纯铜与铜基钎料

用纯铜做钎料时在保护气氛和真空下钎焊，钎焊温度为1 100~1 150℃。在该温度下零件的内应力已被消除。又因零件系整体加热，热应力小，焊件不会产生应力开裂现象。其他可用于高温合金钎焊的铜基钎料见表4.6-30。铜及铜基钎料在高温合金上的流动性差，钎料应放在紧靠接头的地方。铜及铜基钎料只能用于工作温度不超过400℃、受力很小的一般高温合金构件。另外，铜和铜基钎料不能用于钎焊钴基高温合金，因为铜会污染母材，引起微裂纹。

（4）其他钎料

锰基钎料可用于在600℃下工作的高温合金构件的钎焊。这类钎料的塑性良好，可制成各种形式使用，与母材作用弱，但其抗氧化性较低。锰基钎料主要采用保护气体钎焊，不适用于火焰钎焊和真空钎焊。常用锰基钎料的化学成分及性能见表4.6-30。

贵金属钎料主要有金基钎料和含钯钎料。贵金属钎料的主要优点有：钎焊工艺性能优良；对母材的溶蚀作用小，可钎焊薄件；无易挥发组分，可钎焊在高温下于真空中工作的部件；不含能形成难熔氧化物的组分，在保护气氛或真空中钎焊时对气氛纯度和真空度要求不高；抗腐蚀性好；加工性好，容易加工成丝、片、箔等形式，使用方便，因此在航空、航天和电子工业得到广泛地应用。但这类钎料中含有较多的贵金属，价格昂贵。典型的金基钎料有Au80Cu和Au82Ni，其化学成分和性能列于表4.6-30。含钯钎料主要有银铜钯钎料、银钯锰钎料、银锰钯钎料和镍锰钯钎料，见表4.6-30。银铜钯系钎料的综合性能最好，但钎焊接头的工作温度较低（不高于427℃）。虽然镍锰钯系钎料的熔点较低，但接头高温性能较高，可在800℃下工作。

7.1.3 钎焊工艺

高温合金钎焊前应彻底清除表面的油污、氧化皮、电火花加工再熔层及其他脏物。除油可用汽油、丙酮、酒精或清洗剂清洗，钎焊面可达性差及结构复杂零件的除油可在超声波槽中进行。表面氧化膜的去除一般采用砂纸打磨、毡轮抛光或吹砂（单晶合金不推荐吹砂，因为吹砂后表面存在应力，在钎焊加热过程中有可能发生再结晶）等方法，也可采用化学清洗的方法去除表面的氧化膜。

焊件应精密装配，保持装配间隙，控制钎料加入量，并用适当的定位方法保持焊件和钎料的相对位置。

用银基钎料钎焊时可选用钎剂FB102［成分为（质量分数）：无水氟化钾42%，氟硼酸钾23%，硼酐35%］。因钎焊温度不高，钎剂同母材的反应较弱，不会因钎剂中硼的析出而影响合金的表面。钎焊含铝量高的沉淀强化高温合金时，应在FB102钎剂中添加10%~20%硅氟酸钠，或在FB102钎剂中加入10%~20%铝钎剂（如FB201等），以增加钎剂去除氧化铝的能力。当钎焊温度超过900℃，则应选用钎剂FB105［成分为（质量分数）：硼酸80%，脱水硼砂14.5%，氟化钙5.5%］，但钎焊加热温度不宜过高，钎焊时间要短，以免钎剂与母材发生强烈的反应。



6

为了防止母材应力开裂，必须尽量减少零件的内应力，如将经冷加工的零件在钎焊前进行去应力处理；钎焊时加热尽量均匀以及零件在钎焊加热过程中能自由膨胀和收缩等。但对于沉淀强化高温合金来说，在时效过程中将不可避免地形成内应力，对钎焊时的应力开裂特别敏感。最有效的措施是先将零件固溶处理，然后在稍高于时效处理的温度下进行钎焊，最后进行时效处理。这样既可减少应力开裂的可能性，又不会因钎焊温度过高而发生过时效现象。

高温合金绝大部分是在真空或保护气氛炉中钎焊的。使用保护气氛炉中钎焊时对气体纯度要求很高，使用氩气或氢气作为保护气体时要求其露点低于 -54℃。对于铝、钛含量小于 0.5% 的高温合金，这样高的气体纯度已经足够了。但是铝、钛含量增多时，合金表面在加热时仍发生氧化，必须采用以下措施：

1）添加少量钎剂，如 FB105，利用钎剂来去除氧化膜，但钎剂加入量不能多；

2）零件表面镀镍，镀层厚度为 0.025 ~ 0.038 mm；

3）将零件在湿氢中预先氧化，然后用硝酸和氢氟酸混合液去掉表面上铝和钛的氧化物，使表面不再含铝和钛，从而达到防止钎焊加热时铝、钛氧化物的目的；

4）将钎料预先喷涂在待钎焊表面上；

5）附加少量气体钎剂，如三氯化硼。

目前真空钎焊已在很大程度上取代了保护气氛钎焊。因为真空钎焊能获得更好的保护效果和钎焊质量。真空钎焊铝、钛含量高的高温合金时可采取以下措施改善钎料对母材的润湿性能：

1）在母材表面镀镍，但应注意镀镍厚度对钎焊接头性能是有影响的，镀层太薄对合金表面不起保护作用，镀层太厚将降低接头强度；

2）将零件放在盒内真空钎焊，盒中可再放吸气剂，如锆在高温下的吸气作用，促使在盒内形成一个局部高真空，防止合金表面氧化。

镍基高温合金真空钎焊时的热态真空度应不低于 10^{-2} Pa。

保护气氛钎焊和真空钎焊的主要工艺参数是钎焊温度和保温时间。钎焊温度和保温时间根据所用钎料和母材的性能确定。钎焊温度一般应高于钎料液相线 30 ~ 50℃。适当提高钎焊温度，可降低钎料的表面张力，改善钎料润湿性和填充间隙能力。但钎焊温度过高，对高温合金钎焊接头的性能有不利影响，会造成钎料流失，还可能导致由于钎料与母材作用过分而引起的溶蚀，晶间渗入，形成脆性相，以及母材晶粒长大等问题。保温时间取决于母材特性、钎焊温度及装炉量等因素。保温时间过长，也会出现上述问题。在确定高温合金钎焊工艺参数时，还应考虑母材的热处理制度，尽量与母材的热处理制度相匹配。

7.1.4　接头缺陷及防止

高温合金钎焊接头中的缺陷主要有未钎透（钎着率低）、溶蚀和孔洞（缩孔）等。

未钎透对气密性接头是不允许的缺陷，对承力接头危害也较大，因此应避免。消除未钎透提高钎着率的方法有：正确设计钎焊接头各参数，特别是钎焊面积大时，应设计有排气沟槽；加强焊前处理，使钎料能很好地在母材上铺展和填缝；调整钎焊工艺参数，使钎料流满钎焊接头间隙。

溶蚀是由于钎料过度溶解母材而引起的凹陷。当钎料选择不合适或钎焊工艺参数不当时，易形成这种缺陷，在钎焊薄件时应特别注意。防止方法是：选择含硼、碳元素量低的钎料；限制钎焊温度最高值和保温时间。

孔洞（缩孔）缺陷在钎焊间隙较大时经常出现。当孔洞较小时，对接头性能影响不大，对连续较大面积的缺陷则应避免。可通过调整装配间隙、适当提高钎焊温度等措施来减少或消除孔洞。

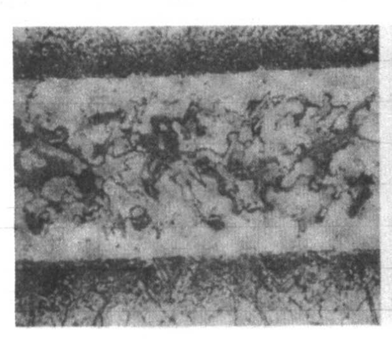
7.1.5　接头组织和力学性能

高温合金钎焊接头组织和母材化学成分、所用钎料、钎焊接头间隙、钎焊工艺规范和焊后热处理等因素有关。

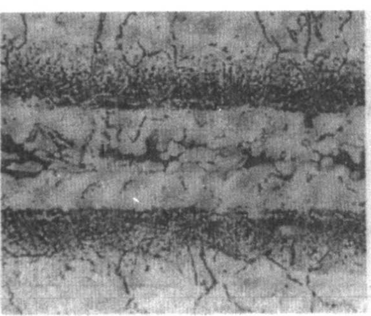
镍基钎料中含有较多的硼、硅作为降熔元素，在钎料中形成相当多的硼化物和硅化物。因此高温合金钎焊接头的组织和性能与钎焊间隙密切相关。图 4.6-14 是 BNi75CrSiB 钎料钎焊 GH4037 接头的组织。当接头间隙为 0.1 mm 时，钎缝中除了有白色 γ 固溶体外，还有大量的 CrB（含 W、Mo）、Ni_3Si 化合物相。同时钎料中的硼元素发生向母材近缝区扩散的现象；当接头间隙减小到 0.05 mm 时，化合物数量减少，但相的种类是相同的；当接头间隙进一步减少到 0.02 mm 时，大部分化合物相消失，只是在钎缝中央出现断续的 CrB 相。接头间隙更小，化合物相全部消失。钎焊规范也对钎焊接头组织产生影响。图 4.6-15 是图 4.6-14 接头经 1 050℃ × 1 h 扩散处理后的组织。可见间隙为 0.1 mm 和 0.05 mm 的接头经 1 050℃/1h 扩散处理后，钎缝中只有 γ 固溶体和断续分布的 CrB 化合物相，其他化合物相已消失，而间隙为 0.02 mm 的接头，钎缝组织则全部为 γ 固溶体。0.1 mm 间隙的接头经 1 050℃/2 h 扩散处理后，化合物相已全部消失。

用贵金属钎料，如 Au82Ni、银锰钯钎料 SMP1 和 SMP2、镍锰钯钎料 NMP 钎焊时，因钎料本身不含脆性相，所以钎焊间隙对接头组织及性能影响比较小。

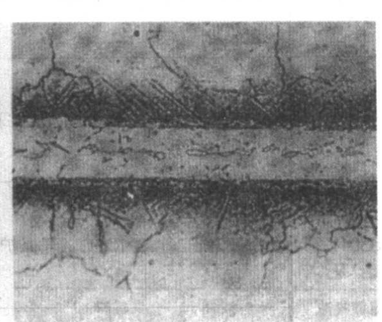
高温合金钎焊接头的性能取决于所选用的钎料性能、钎焊工艺、接头设计及焊后热处理（含扩散处理）等因素。选用适宜的钎料和钎焊工艺，可获得性能较高的钎焊接头。表 4.6-31 列出了不同钎料钎焊高温合金接头的力学性能。



(a) 接头间隙0.1mm



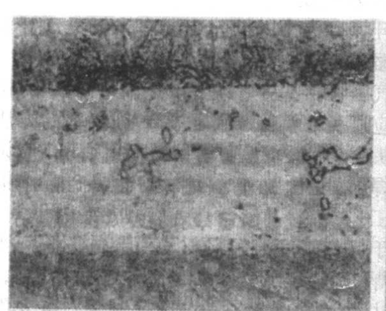
(b) 接头间隙0.05mm



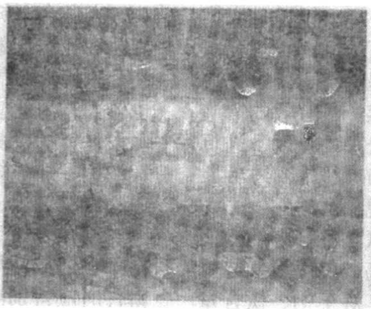
(c) 接头间隙0.02mm

图 4.6-14　BNi75CrSiB 钎料钎焊 GH4037 高温合金的接头组织　（1 120℃ × 10 min 钎焊，× 250）

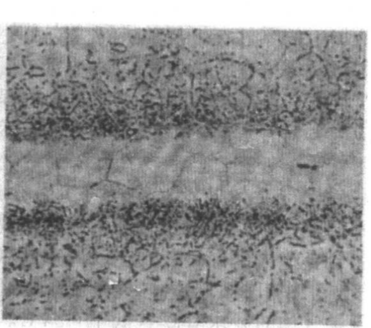




(a) 接头间隙0.1mm



(b) 接头间隙0.05mm



(c) 接头间隙0.02mm

图4.6-15 BNi75CrSiB钎料钎焊GH4037高温合金的接头经扩散处理后的组织
(1 120℃/10 min + 1 050℃/1 h钎焊及扩散处理)

表4.6-31 高温合金钎焊接头的力学性能

母材	钎料	钎焊条件	试验温度/℃	接头/MPa		接头持久性能	
				σ_b	τ_b	应力/MPa	寿命/h
GH1140	HLNi-2	1 200℃氩气保护钎焊	20	—	570	—	—
			900	—	73.5	—	—
GH909①	BNi82CrSiB	1 045℃钎焊+980℃扩散	20	763	—	—	—
			650	733	—	338②	52②
		1 045℃钎焊+980℃与960℃扩散	650	—	—	338②	72②
GH3030	BNi74CrSiB	—	600	—	277~296	—	—
			700	—	273~283	—	—
			800	—	219~223	—	—
	BNi82CrSiB	1 080~1 180℃真空钎焊	600	—	220	—	—
			700	—	228	—	—
			800	—	224	—	—
		1 110~1 200℃真空钎焊	20	311	230	—	—
			650	205	126	—	—
	BNi68CrWSiB	1 105~1 205℃真空钎焊	20	—	433	—	—
			650	—	178	—	—
GH3039①	ВПР11-40Н	1 110℃真空钎焊	20	458	—	—	—
			800	—	—	60	>245
			900	117	—	—	—
GH3044	HLNi-2	1 080~1 180℃真空钎焊	20	—	234	—	—
			900	—	162	—	—
			1 100	—	74	—	—
	BNi82CrSiB	1 100℃氩气保护扩散钎焊	20	—	300	—	—
			800	—	270①	—	—
			900	—	114	—	—
	*ВПР11-40Н	1 110℃真空钎焊	20	666	—	—	—
			800	—	—	60	125
			900	149	—	—	—





续表 4.6-31

母　材	钎　料	钎焊条件	试验温度/℃	接头/MPa		接头持久性能	
				σ_b	τ_b	应力/MPa	寿命/h
GH4033	NMP	1 120 ~ 1 180℃真空钎焊	20	—	338	—	—
			600	—	276	—	—
			700	—	257	—	—
			750	—	216	—	—
			800	—	154	—	—
			850	—	122	—	—
	SMP1	1 150 ~ 1 200℃真空钎焊	600	—	154	—	—
			700	—	122	—	—
			750	—	122	—	—
			800	—	108	—	—
			850	—	76	—	—
	SMP2	1 170 ~ 1 200℃真空钎焊	750	—	170	—	—
			800	—	138	—	—
GH4169	82.5Au-17.5Ni	1 030℃真空钎焊	20	—	320	—	—
			538	—	220	—	—
	Ni-3.5B-1.5Si	1 150 ~ 1 200℃真空钎焊	760	—	308	—	—
			800	—	192	—	—
			900	—	75	—	—
GH5188	Ni70CrSiB	1 170℃真空钎焊	20	—	308	—	—
			648	—	260	—	—
			870	—	90	—	—
K403	BNi75CrSiB	1 130℃真空钎焊	950	270	—	—	—
	BNi68CrWSiB	1 105 ~ 1 205℃真空钎焊	20	565	—	—	—
			950	317	—	—	—
K465[①]	ВПР24	1 220℃真空钎焊	20	767	—	—	—
			850	648	—	—	—
			900	560	—	—	—
			975	553	—	—	—
	ВПР27	1 150℃真空钎焊	20	768	—	—	—
			900	—	—	60	>222.5
DZ22[①]	BNi71CrSi	1 180℃/2 h 真空钎焊	850	120	—	—	—
	BNi68CrWSiB	1 180℃/2 h 真空钎焊	950	—	—	180	11.5
		1 180℃/24 h 真空钎焊	980	—	—	145	39 ~ 90
	300	1 180℃/2 h 真空钎焊	850	825	—	—	—
			950	—	—	180	26 ~ 116
		1 180℃/4 h 真空钎焊	980	—	—	145	125 ~ 137
	Co50NiCrWB	1 180℃/4 h 真空钎焊	980	—	—	145	53 ~ 115
DZ125[①]	Z1P	1 180℃/4 h 真空钎焊	980	—	—	132	190 ~ 273
	300	1 180℃/4 h 真空钎焊	980	—	—	132	350
						154	99 ~ 127

续表 4.6-31

母材	钎料	钎焊条件	试验温度/℃	接头/MPa		接头持久性能	
				σ_b	τ_b	应力/MPa	寿命/h
DZ125①	Co50NiCrWB	1 180℃/4 h 真空钎焊	980	—	—	132	251～349
						154	58
	Co45NiCrWB	1 200℃/4 h 真空钎焊	980	—	—	132	257～291
						154	>60
	300E	1 200℃/4 h 真空钎焊	980	—	—	154	>120
·IC6	BNi82CrSiB	1 050℃真空钎焊	900	287	—	—	—
	300	1 180℃真空钎焊	900	531	—	160	3～4
	Co50NiCrWB	1 180℃真空钎焊	900	418	—	160	1.5～2
	300D	1 180℃真空钎焊	900	498	—	—	—
IC6A①	Co45NiCrWB	1 220℃真空钎焊	900	—	—	160	50～136
	300E	1 180℃真空钎焊	900	—	—	160	62～73
IC10①	300	1 180℃真空钎焊	900	488	—	160	200
	镍基含铪钎料	1 240℃真空钎焊	1 100	—	—	32	>100
GH909 + GH3536①	BNi82CrSiB	1 045℃钎焊 + 980℃扩散	20	510	—	—	—
			650	550	—	338②	37.5②
K403 + GH3030	BNi82CrSiB	1 040～1 175℃真空钎焊	20	229	—	—	—
			900	182	—	—	—
K403 + GH3044	BNi74CrSiB	1 080～1 180℃真空钎焊	800	—	—	49	≥80
			900	—	—	9.8	≥70
K403 + GH3039①	BNi68CrWSiB	1 090℃真空钎焊	900	157	—	40	185.5
	BNi75CrSiB	1 060～1 090℃真空钎焊	900	150	—	40	68.5～135
K403 + DZ4①	BNi68CrWSiB	1 090～1 170℃真空钎焊	980	—	—	126	66
	300	1 090～1 170℃真空钎焊	900	646	—	126	145～189
K465 + GH3044①	ВПр24	1 220℃真空钎焊	20	425	—	—	—
			900	252	—	—	—
IC10 + GH3039①	Co50NiCrWB	1 180℃真空钎焊	900	180	—	40	160～200

① 北京航空材料研究院研究结果，ВПр11－40Н、ВПр24、ВПр27为俄罗斯牌号钎料，Z1P为北京航空材料研究院研制的镍基钎料，Co50NiCrWB、Co45NiCrWB、300D、300E为北京航空材料研究院研制的钴基钎料。

② 起始应力为338 MPa，23 h后每8 h增加应力24 MPa。

7.2 大间隙钎焊

在大多数情况下钎焊是利用毛细现象使熔化的钎料流入并停留在接头间隙内，因此要求钎焊接头的装配间隙保持在较小的范围内，一般小于0.15 mm，所以钎焊又称为毛细钎焊。要保证这样小的间隙，要求较高的装配精度。但是在生产中对一些结构复杂或者难加工的材料，如精铸叶片（其钎焊面为铸造表面），要保证这样的装配间隙或者是相当困难的，或者是很不经济的。为此出现了大间隙钎焊工艺，并逐步在生产中取得了应用。

大间隙钎焊技术这样有两种：混合粉末法和预填高熔点粉末法。

7.2.1 混合粉末法

大间隙钎焊的主要困难是间隙无毛细作用，熔化的钎料不能停留在接头间隙内。为此必须采用一种黏度很大的特殊钎焊材料来填充接头的大间隙。在常规钎料中，结晶温度区间大的钎料黏度较大，但也不能填充太大的间隙。为达到黏度大的要求，大间隙钎焊材料有两部分组成：一部分是熔点较低的合金粉末，称低熔点组分，即通常所用的钎料；另一部分是熔点较高的金属或合金粉末，称高熔点组分，它在钎焊温度下不熔化。将它们混合均匀，就成为大间隙钎焊材料。钎焊时将大间隙钎焊材料结实地填满钎焊接头间隙。在钎焊加热过程中，混合物中的两种合金粉末发生烧结，并且同被连接零件烧结起来。当达到钎焊温度时，钎焊材料中的低熔点组分熔化，润湿母材，并同高熔点组分形成黏度很大的黏滞物，停留在接头间隙中，从而实现连接。

大间隙钎焊材料中的高熔点组分可采用镍粉、镍铬（如Ni－20Cr）粉、含少量硅硼的镍硅硼（如Ni－1.5～2.5Si－0.5～1B）粉及各种高温合金粉末。

大间隙钎焊材料的使用方式与通常的毛细钎焊不同。由于大间隙钎焊材料的黏度很大，并且接头间隙不起毛细作用，如果将钎焊材料安置在接头的开口处就不能填满大间隙接头。因此，大间隙钎焊材料必须放在接头间隙内并捣实。为了防止钎焊材料中的低熔点组分流出接头间隙，必须在接头周围涂上阻流剂，阻止液态钎料流出接头间隙，以保证在钎焊温度下大间隙钎焊材料中液相同固相合适的比例。



大间隙钎焊接头的间隙应在 0.5 ~ 1.5 mm 范围内，间隙太小不利于放置钎焊材料。

钎焊热循环也是相当重要的参数。大间隙钎焊时，由于粉末状大间隙钎焊材料的比表面积很大，在钎焊加热过程中，低熔点组分会与高熔点组分发生合金化反应，此反应比毛细钎焊时熔化钎料与母材的合金化反应要快得多，因而改变低熔点组分的成分，并使其熔化温度提高，最终必须提高钎焊温度，或者形成由局部不熔化钎料组成的多孔接头。因此大间隙钎焊时加热速度不能慢，尤其在通过低熔点组分的固相线到液相线这一温度区间时的加热速度一定要快。一般从低熔点组分的固相线以下约 50℃ 开始直到钎焊温度的这一温度区间，加热速度不应小于 10℃/min。对于冷却速度无严格要求，只要不出现大的热应力而使接头开裂即可。

混合粉末法的缺点是：

① 低熔点组分和高熔点组分粉末在加热过程中就可能发生反应，当低熔点组分开始熔化后反应加剧，其结果使低熔点组分的熔点提高；

② 钎焊材料不可能完全填满接头间隙，因为粉末颗粒之间存在空隙，即接头间隙在填塞钎焊材料时有一定的空隙率；另外液态钎料在凝固时也会发生收缩，虽然部分空隙可有接头外圆角处的多余钎料来填补，但由于其流动性差，无法完全填补，接头内的缩孔往往是无法避免的；

③ 大间隙钎焊接头的局部间隙就是高熔点粉末颗粒之间的距离。由于混合粉末中掺有钎料，高熔点粉末颗粒之间的距离不可能太小，加上又有空隙，高熔点粉末颗粒之间形成的局部间隙大，因此在接头内极易形成脆性化合物相；

④ 在接头外部会形成一个由烧结的高熔点组分组成的多孔骨架，外观很差。

为了克服上述缺点，最根本的办法是提高混合粉末填充间隙时的密度。为此派生了烧结片法和热等静压片法：前者是将混合粉末烧结成复合钎料片，再将复合片放在接头内；后者是将混合粉末用热等静压法（HIP）制成复合钎料片，然后填放在接头内。采用热等静压法，复合钎料内粉末颗粒之间几乎无空隙存在，大间隙钎焊材料的密度大大提高。

烧结复合钎料或热等静压复合钎料片只能用于形状简单且规则的接头，使用场合有限。

7.2.2 预填高熔点粉末法

这种方法是将高熔点粉末填入接头间隙后将工件进行真空烧结，使间隙中的高熔点粉末烧结成金属骨架，高熔点粉末颗粒之间形成很多微小的局部间隙，起毛细作用。然后将低熔点组分即钎料放在接头外部，当加热到钎焊温度时，熔化的钎料向烧结粉末颗粒之间形成的间隙填充，形成钎焊接头。这种工艺的优点是：

① 钎料熔化前，钎料粉末和高熔点粉末不发生反应，钎料的成分和熔化温度不会在加热过程中发生变化。钎料只有在完全熔化并能够流动后，才开始填充高熔点粉末颗粒之间形成的间隙，并与高熔点粉末发生反应；

② 由于间隙内预填的都是高熔点粉末，粉末颗粒之间形成的间隙由熔化的钎料填充，这同常规的毛细钎焊相似，因此接头内不易形成气孔、缩孔等缺陷；

③ 由于间隙内预填的都是高熔点粉末，没有低熔点组分，高熔点粉末颗粒之间形成的局部间隙比用混合粉末法时要小得多，有利于消除钎缝中的脆性相；

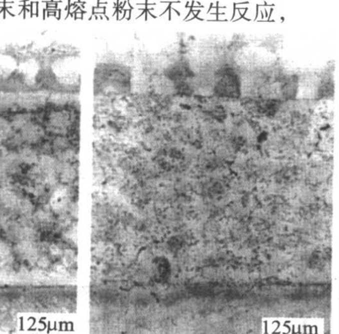
④ 因接头外部放的都是钎料，无高熔点粉末，钎焊后不会在接头外部形成由烧结的高熔点粉末形成的多孔骨架。

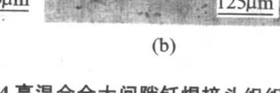
当接头宽度和搭接量不是很大时，可以将接头间隙内预填高熔点粉末后直接进行钎焊，以减少烧结这一道工序。

如果接头简单，形状规则，可将高熔点粉末压制成片，烧结后再放在接头间隙内进行钎焊。由于高熔点烧结片的密度高，粉颗粒之间的距离进一步缩小，更有利于消除缩孔和钎缝中的脆性化合物相。

7.2.3 大间隙钎焊接头的组织和性能

图 4.6-16 是在接头间隙中预填 FGH95 高温合金粉末，采用 BNi68CrWSiB 钎料钎焊 K403 + DZ4 高温合金的大间隙钎焊接头组织。可见，预填高温合金粉末的粒度对大间隙钎焊接头组织的影响很明显。在预填 80 ~ 105 μm 粒度 FGH95 粉的钎焊接头中，接头组织主要为：FGH95 粉颗粒，以粉颗粒和母材表面为晶核结晶出的白色固溶体，以及在固溶体上分布的小白块硼化物，此外在粉颗粒间间隙较大处，有一些黑色的低熔共晶相存在，粉颗粒中有少量小黑点状硼化物析出，预填 FGH95 粉的粒度减小至 50 ~ 80 μm 接头中粉颗粒间黑色低熔共晶相消失，粉颗粒间组织为固溶体基体上分布有少量的小白块硼化物相，同时由于硼向粉颗粒中的扩散更充分，粉颗粒中已析出大量弥散分布的小黑点状硼化物。粉粒度减小至 40 ~ 50 μm，接头中小白块相进一步减少，黑点状硼化物相析出更明显，分布也更离散化，这种接头组织对性能改善是有利的。但采用较细粉也有不利的一面，粉较细时（40 ~ 50 μm），由于粉颗粒间间隙很小及粉的整个表面积增加，粉和钎料之间的相互作用加剧，钎料熔化流入粉颗粒间时，钎料中的主要降熔元素硼向粉中扩散加快，钎料对粉的溶解增多，使钎料发生合金化，熔点迅速升高，流动性下降，从而不能将全部钎缝填满。尤其当钎料流动填缝长度比较大时，这种情况更严重，即使形成接头，接头中也有较多的空洞缺陷。焊后扩散处理可改善接头组织，提高接头性能。图 4.6-16d 为图 4.6-16b 接头经 1 090℃/24 h 扩散处理后的组织，比较两图可以看到：经扩散处理后，原钎焊接头中存在的小块状和点状硼化物相大大减少，分布也更分散，粉颗粒间固溶体已完全连成一片。





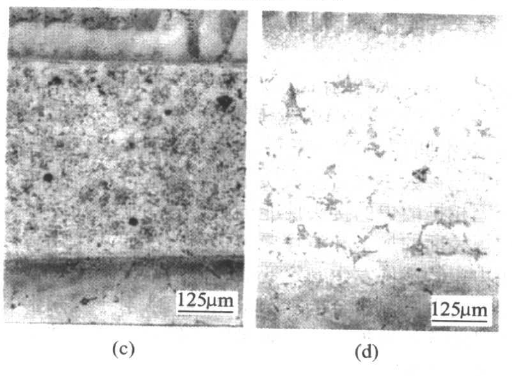


图 4.6-16 K403 + D24 高温合金大间隙钎焊接头组织（FGH95 粉，BNi68CrWSiB 钎料，1 170℃/30 min 钎焊）
（a）FGH95 粉粒度 80 ~ 105 μm；（b）FGH95 粉粒度 50 ~ 80 μm；
（c）FGH95 粉粒度 40 ~ 50 μm；（d）图 4.6-15（b）接头经 1 090℃/24 h 扩散处理后的组织



表 4.6-32 高温合金大间隙钎焊接头的性能[1]

母材	钎料	试验温度 /℃	接头抗拉强度 /MPa	接头持久性能	
				应力/MPa	寿命/h
K465[2]	ВПР24	20	833	—	—
		975	574	—	—
DZ22	300	950	—	153	170 ~ 231
		980	—	145	44 ~ 85
DZ125	300	980	—	132	46 ~ 141
	Co50NiCrWB	980	—	110	> 140
	Co45NiCrWB	980	—	132	16 ~ 46
	300E	980	—	132	22 ~ 65
IC10	300	900	510 ~ 536	120	200
				160	75
	镍基含锆钎料	1 100	—	24	84
K403 + DZ4	300	900	700 ~ 704	—	—
		980	—	126	106 ~ 175
	BNi68CrWSiB	980	—	126	29
IC10 + GH3039	Co50NiCrWB	900	169 ~ 178	40	214

① 本表所列数据引自北京航空材料研究院研究结果。
② K465 合金接头间隙中加镍丝网，其他合金接头间隙中预填 FGH95 高温合金粉末。

北京航空材料研究院在接头间隙中预填 FGH95 高温合金粉末，再采用不同钎料钎焊，所获得的一些高温合金大间隙钎焊接头的性能列于表 4.6-32。

7.3 固相扩散焊

固相扩散焊几乎可以焊接各类高温合金。由于高温合金含有 Cr、Al 等元素，表面氧化膜很稳定，难以去除，焊前必须严格加工和清理，甚至要求表面镀层后才能进行固相扩散焊接，这样焊接成本会增高。

由于高温合金的热强性高，变形困难，同时又对过热敏感，因此必须严格控制焊接工艺参数，才能获得与母材等强的焊接接头。扩散焊的主要工艺参数是焊接温度、焊接压力和保温时间，以及扩散处理时的温度和时间等。高温合金扩散焊时，需要较高的焊接温度和压力，焊接温度约为 0.8 ~ 0.85 T_m（合金的熔化温度），焊接压力通常为略低于相应温度下合金的屈服应力。其他参数不变时，焊接压力越高，使界面变形增大，粗糙度降低，有效接触面积增大，接头性能越好，但焊接压力过高，会使设备结构复杂，造价昂贵。焊接温度增高，接头性能提高，但过高时会引起晶粒长大，塑性降低。

固相扩散焊含铝、钛高的沉淀强化高温合金时，由于结合面上会形成 Ti（CN）、$NiTiO_3$，造成接头性能降低。若加很薄的 Ni - 35% Co 中间层合金，则可获得组织均匀的接头，同时可以减小工艺参数变化对接头质量的影响。

高温合金固相扩散焊的接头性能虽然很好，但存在以下缺点：①对被焊表面的加工和清理要求很高；②要求采用较大和稳定的压力；③工件发生一定变形，焊后需要加工，而沉淀强化合金和铸造高温合金的加工很困难；④对于复杂形状的工件，不可能均匀地加压；⑤焊接成本较高。这些缺点限制了固相扩散焊的使用。

7.4 过渡液相扩散焊

过渡液相扩散焊（简称 TLP 扩散焊）是 20 世纪 70 年代初发展的一种主要用于连接高温合金的扩散焊工艺，其原理是将主要成分接近于基体、但含有一定量降熔元素（如硼）的中间层合金置于被焊接面之间，在真空中加热到焊接温度时，中间层合金发生熔化，在焊接面之间形成一液态薄膜。在随后的保温中，中间层合金与基体金属之间的元素相互扩散，使中间层合金成分改变，熔点提高，从而在焊接温度下产生等温凝固。继续保温扩散，接头组织、成分与基体进一步均匀化，最终实现接头的高性能连接。这种方法结合了固相扩散焊和高温钎焊两种方法的优点，而避免了两者的缺点。首先与固相扩散焊相比，加工和处理方法较简单，只需采用简单的工装就可实现复杂形状构件的连接；其次，TLP 扩散焊形成的接头在组织性能上与固态扩散连接类似，而不像钎焊接头那样与基体金属存在较大差异。

TLP 扩散焊的主要参数有压力、中间层合金成分、温度和保温时间。

TLP 扩散焊的压力参数仅仅是以焊接面保持良好接触为目的，因此可以不加压力或加很小的压力，设备就可以大大简化，并且可防止工件在连接时发生塑性变形。

中间层合金成分及性能对 TLP 扩散焊来说是至关重要的。中间层合金的熔化温度应保证在连接温度下不损害母材的性能；中间层合金的成分和厚度应保证焊缝在焊接温度下能达到等温凝固，并经足够时间的保温使其化学成分和显微组织均达到与母材均匀化，不产生有害的第二相。为了使接头与母材在成分和组织上均质化，中间层合金应以被连接母材的成分作为基本成分，再加入降熔元素，以满足对中间层合金熔化温度的要求。降熔元素有硼、硅、铪、锆等，其中硼的效果最好。其原因是硼对镍基合金的降熔作用特别明显，只需少量的硼即能将镍基合金的熔化温度降到满意的程度；硼的原子半径很小，它的扩散速度高，尤其是晶间扩散的速度极高。由于硼向母材的快速扩散，可使中间层合金与母材迅速达到均质化，并且避免在接头中形成有害的第二相。

加热温度和保温时间取决于中间层合金的熔化温度、接头的工作要求和母材允许加热的温度。如果要求接头与母材



等强度，并且加热温度不影响母材的性能，则应采用高温和长时间的焊接规范；如果接头性能要求较低，或者母材不能经受太高的温度，则采用较低温度和较短时间的焊接规范。

目前 TLP 扩散焊主要用于沉淀强化高温合金和铸造高温合金的连接，因为这些合金很难用熔焊方法焊接。TLP 扩散焊特别适用于高性能铸造高温合金，如定向凝固高温合金、单晶合金及铸造镍铝系金属间化合物材料等的连接。近十几年来，北京航空材料研究院根据新型航空发动机的设计需求和我国新型铸造高温合金的发展情况，一直在开展定向凝固高温合金、定向凝固 Ni_3Al 基高温合金和单晶合金 TLP 扩散焊工艺的研究工作，在适用中间层合金成分的设计、中间层合金的制备及 TLP 扩散焊工艺的探索研究取得了一定进展。分别设计制备了适用于我国定向凝固高温合金 DZ22，第一代单晶合金 DD3，第二代单晶合金 DD6 和定向凝固 Ni_3Al 基高温合金 IC6、IC10 等 TLP 扩散焊的中间层合金，这些中间层合金分别以所焊母材的成分为基，加入硼作为降熔元素，使用形式为非晶态箔材和粉末，表 4.6-33 列出了上述先进铸造高温合金 TLP 扩散焊接头的高温持久性能。

表 4.6-33　铸造高温合金 TLP 扩散焊接头的高温持久性能①

母材	中间层合金代号及使用形式	焊接规范	接头高温持久性能		
			温度/℃	应力/MPa	寿命/h
DZ22	Z2P，粉末，接头间隙 0.1 mm	1 210℃/24 h	980	166	51 ~ 77
	Z2F，非晶态箔，0.04 mm 厚，2 层	1 210℃/24 h	980	166	126 ~ 203
				186	80 ~ 166
DD3	D1P，粉末，接头间隙 0.1 mm	1 250℃/24 h	980	181	246.5 ~ 268
				204	90 ~ 113
	D1F，非晶态箔，0.02 mm 厚，2 层	1 250℃/24 h	980	181	198 ~ 379.5
				204	124 ~ 137
DD6	XH3，粉末，接头间隙 0.1 mm	1 290℃/12 ~ 24 h	980	225	> 100
			1 100	112	> 100
IC6	I7P，粉末，接头间隙 0.1 mm	1 260℃/24 h	1 100	50	11[15]
		1 260℃/36 h	1 100	36	38 ~ 63
			980	100	62.5 ~ 213[15]
				140	39.5[15]
	7B，粉末，接头间隙 0.1 mm	1 260℃/36 h	1 100	36	89.5 ~ 119.5
IC10	XH2，粉末，接头间隙 0.1 mm	1 270℃/24 h	1 100	50	> 91
	12，粉末，接头间隙 0.1 mm	1 270℃/24 h	1 100	36	> 100

① 本表所列数据引自北京航空材料研究院研究结果。

编写：毛　唯（北京航空材料研究院）
魏祚伟（北京航空材料研究院）



第7章 铝、镁及其合金的焊接

1 铝及铝合金的焊接

1.1 铝及铝合金概述

铝及铝合金构件质量轻，导热性、导电性、耐蚀性好，比强度高，在各工业部门特别是在航空、航天、汽车、舰船工业上获得越来越多的应用，推动了铝及铝合金焊接技术的发展。

搅拌摩擦焊、变极性等离子弧焊、局部真空电子束焊、激光焊、摩擦塞补焊等新型焊接和补焊方法的出现，使铝及铝合金焊接技术得到很大进步，使原本认为不可焊的铝合金成为可焊，为获得高质量铝及铝合金焊缝提供技术保证，进一步扩大了铝及铝合金焊接结构的应用范围。

1.1.1 铝及铝合金物理特性

铝的物理特性见表4.7-1，和其他金属差别很大，导致铝及铝合金具有独特的焊接工艺特点。

表4.7-1 铝的物理特性

特性参数 / 金属名称	密度 $/g\cdot cm^{-3}$	电导率 /IACS%	热导率 $/W\cdot(m\cdot K)^{-1}$	线胀系数 $/10^{-6}K^{-1}$	比热容 $/J\cdot(kg\cdot K)^{-1}$	熔点 /℃
铝	2.70	62	222	23.6	940	660
铜	8.925	100	394	16.5	376	1 083
65/35黄铜	8.43	27	117	20.3	368	930
低碳钢	7.80	10	46	12.6	496	1 350
304不锈钢	7.88	2	21	16.2	490	1 426
镁	1.74	38	159	25.8	1 022	651

铝及铝合金在空气中极易氧化，生成氧化铝（Al_2O_3）薄膜，熔点高，性能稳定，能吸潮，不易去除，熔焊或钎焊易生成焊缝气孔、氧化夹杂、未熔合、未焊透等缺陷，焊接前需进行严格表面清理，去除氧化膜，焊接过程中应防止生成氧化膜或清除新生氧化膜。

铝及铝合金比热容、电导率、热导率比钢大，焊接热通过母材流失迅速，熔焊需采用能量集中的热源，电阻焊需采用大功率电源。

铝及铝合金线膨胀系数比钢大，焊件变形趋势较大，需采取预防焊接变形措施。

铝及铝合金对光、热反射能力较强，熔化前无明显色泽变化，人工操作熔焊和钎焊作业时会感到判断困难。

1.1.2 铝及铝合金牌号、成分和性能

铝及铝合金分为变形铝及铝合金和铸造铝合金。

铝及铝合金共有8个合金系：1×××系（工业纯铝）、2×××系（铝-铜）、3×××系（铝-锰）、4×××系（铝-硅）、5×××（铝-镁）、6×××系（铝-镁-硅）、7×××系（铝-锌-镁-铜）、8×××系（其他）。

铝及铝合金分为非热处理强化和热处理强化两类。非热处理强化铝合金只能变形强化，不能热处理强化，热处理强化铝合金可热处理强化和变形强化。

国标GB/T 3190—1996、GB/T 3880—1997、GB/T 1173—1995规定了变形铝合金牌号、化学成分、力学性能和铸造铝合金牌号、化学成分，见表4.7-2、表4.7-3、表4.7-4、表4.7-5。

1.2 铝及铝合金的熔焊

1.2.1 焊接性

（1）氧化膜

铝和氧亲和力很大，空气中在材料表面极易生成致密的Al_2O_3氧化膜，厚度约0.1 μm。Al_2O_3氧化膜熔点为2 050℃，约为纯铝的3倍，密度约为铝合金的1.4倍。焊接过程中Al_2O_3氧化膜阻碍金属之间的良好结合，易造成夹渣。Al_2O_3薄膜易吸附水分，会增加焊缝气孔敏感性。焊前及焊接过程中去除氧化膜是焊接铝及铝合金的首要任务。

去除氧化膜有化学方法、机械方法和电子方法。化学方法包括焊前酸洗和焊接过程中使用溶剂；机械方法包括刮削、打磨、锉；电子方法是阴极雾化。溶剂一般用于气焊和钎焊。化学方法和机械方法用于焊前去除氧化膜。无论焊前氧化膜去除多么彻底，立即又会形成新的氧化膜，焊接过程中必须去除氧化膜。电子方法在焊接过程中可去除氧化膜，本质是“阴极雾化”，要求使用交流焊接电流，这是铝合金和其他合金焊接的最大区别。

（2）焊接裂纹

铝热膨胀系数大，是钢的2倍，凝固收缩率约为5%，在拘束条件下焊接应力较大，为产生焊接裂纹提供了力学条件。铝合金焊缝结晶过程中存在低熔共晶物，在已凝固的晶粒间形成液膜，为产生焊接结晶裂纹提供了冶金条件。近缝区母材受焊接热循环峰值温度很高，晶界低熔点共晶物发生聚蒋、熔化，在晶间形成液膜，为产生焊接液化裂纹提供了冶金条件。

焊接裂纹严重破坏焊接接头的连续性，产生应力集中，成为焊接结构低应力脆性断裂、疲劳断裂、延时断裂的源。焊接结构中不允许存在焊接裂纹，发现必须排除、补焊。

1）焊接裂纹分类和特征　铝及铝合金焊接裂纹分为结晶裂纹、液化裂纹和存放裂纹三类。

① 结晶裂纹　焊缝结晶过程中低熔共晶物凝固前固液状态下被拉开，断裂面为自由结晶表面，断口呈“土豆”状，开裂部位在焊缝上，多平行于焊缝，断口形貌见图4.7-1。

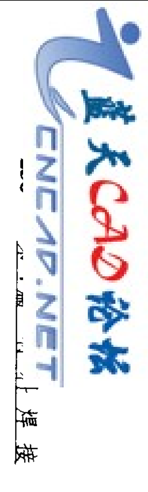
② 液化裂纹　熔合线外侧的母材焊接加热时晶界低熔共晶物聚集、熔化，母材晶粒未熔化，冷却时在焊接应力作用下熔化的低熔共晶物被拉开，断裂面为自由结晶表面，沿轧制晶粒晶界开裂，断口形貌呈“长条土豆”状，开裂部位在近缝区，平行于焊缝分布，断口形貌见图4.7-2。

③ 存放裂纹　以原有焊接微裂纹为源，在长期存放过程中以应力腐蚀开裂模式或在焊接残余应力作用下发生扩展形成的裂纹。断口局部有结晶裂纹或液化裂纹的“土豆”状特征，其他部位有腐蚀产物或呈应力撕裂特征。断口形貌见图4.7-3。



表 4.7-2 铝及铝合金的牌号及化学成分

序号	牌号	化学成分（质量分数）/%													新旧牌号对照
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn		Ti	Zr	其他 单个	其他 合计	Al	
1	1070A	0.20	0.25	0.03	0.03	0.03	—	—	0.07	—	0.03	—	0.03	—	99.70	L1
2	1370	0.10	0.25	0.02	0.01	0.02	0.01	—	0.04	Ca:0.03; V + Ti0.02 B: 0.02	—	—	0.02	0.10	99.70	
3	1060	0.25	0.35	0.05	0.03	0.03	—	—	0.05	V: 0.05	0.03	—	0.03	—	99.60	L2
4	1050	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	—	—	0.05	V: 0.05	0.03	—	0.03	—	99.50	—
5	1050A	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	—	—	0.07	—	0.05	—	0.03	—	99.50	L3
6	1A50	0.30	0.30	0.01	0.05	0.05	—	—	0.03	Fe + Si: 0.45	—	—	0.03	—	99.50	LB2
7	1035	0.35	0.6	0.10	0.05	0.05	—	—	0.10	V: 0.05	0.03	—	0.03	—	99.35	L4
8	1A30	0.10 ~ 0.20	0.15 ~ 0.30	0.05	0.01	0.01	—	0.01	0.02	—	0.02	—	0.03	—	99.30	L4 - 1
9	1100	Si + Fe: 0.95		0.05 ~ 0.20	0.05	—	—	—	0.10	①	—	—	0.05	0.15	99.00	L5 - 1
10	1200	Si + Fe: 1.00		0.05	0.05	—	—	—	0.10	—	0.05	—	0.05	0.15	99.00	L5
11	2A12	0.50	0.50	3.8 ~ 4.9	0.30 ~ 0.9	1.2 ~ 1.8	—	0.10	0.30	Fe + Ni: 0.50	0.15	—	0.05	0.10	余量	LY12
12	2A14	0.6 ~ 1.2	0.7	3.9 ~ 4.8	0.40 ~ 1.0	0.40 ~ 0.8	—	0.10	0.30	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LD10
13	2A16	0.30	0.30	6.0 ~ 7.0	0.40 ~ 0.8	0.05	—	—	0.10	—	0.10 ~ 0.20	0.20	0.05	0.10	余量	LY16
14	2B16	0.25	0.30	5.8 ~ 6.8	0.20 ~ 0.40	0.05	—	—	—	V: 0.05 ~ 0.15	0.08 ~ 0.20	0.10 ~ 0.25	0.05	0.10	余量	—
15	2A20	0.20	0.30	5.8 ~ 6.8	—	0.02	—	—	0.10	V: 0.05 ~ 0.15 B: 0.001 ~ 0.01	0.07 ~ 0.16	0.10 ~ 0.25	0.05	0.15	余量	LY20
16	2014	0.50 ~ 1.2	0.7	3.9 ~ 5.0	0.40 ~ 1.2	0.20 ~ 0.8	0.10	—	0.25	③	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
17	2014A	0.50 ~ 0.9	0.50	3.9 ~ 5.0	0.40 ~ 1.2	0.20 ~ 0.8	0.10	0.10	0.25	Ti + Zr: 0.20	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
18	2219	0.20	0.30	5.8 ~ 6.8	0.20 ~ 0.40	0.02	—	—	0.10	V: 0.05 ~ 0.15	0.02 ~ 0.10	0.10 ~ 0.25	0.05	0.15	余量	LY19
19	2024	0.50	0.50	3.8 ~ 4.9	0.30 ~ 0.9	1.2 ~ 1.8	0.10	—	0.25	③	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
20	2124	0.20	0.30	3.8 ~ 4.9	0.30 ~ 0.9	1.2 ~ 1.8	0.10	—	0.25	③	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
21	3A21	0.6	0.7	0.20	1.0 ~ 1.6	0.05	—	—	0.10④	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LF21
22	3003	0.6	0.7	0.05 ~ 0.20	1.0 ~ 1.5	—	—	—	0.10	—	—	—	0.05	0.15	余量	—
23	3103	0.50	0.7	0.10	0.9 ~ 1.5	0.30	0.10	—	0.20	Ti + Zr0.10	—	—	0.05	0.15	余量	—
24	3004	0.30	0.7	0.25	1.0 ~ 1.5	0.8 ~ 1.3	—	—	0.25	—	—	—	0.05	0.15	余量	—
25	3005	0.6	0.7	0.30	1.0 ~ 1.5	0.20 ~ 0.6	0.10	—	0.25	—	0.10	—	0.05	0.15	余量	—
26	3105	0.6	0.7	0.30	0.30 ~ 0.8	0.20 ~ 0.8	0.20	—	0.40	—	0.10	—	0.05	0.15	余量	—
27	4A01	4.5 ~ 5.0	0.6	0.20	—	—	—	—	Zn + Sn: 0.10	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	LT1



续表 4.7-2

序号	牌号	化学成分（质量分数）/%														新旧牌号对照
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn		Ti	Zr	其他		Al	
													单个	合计		
28	4A11	11.5～13.5	1.0	0.50～1.3	0.20	0.8～1.3	0.10	0.50～1.3	0.25	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	LD11
29	4043	4.5～6.0	0.8	0.30	0.05	0.05	—	—	0.10	①	0.20	—	0.05	0.15	余量	—
30	4043A	4.5～6.0	0.6	0.30	0.15	0.20	—	—	0.10	①	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
31	4047	11.0～13.0	0.8	0.30	0.15	0.10	—	—	0.20	①	—	—	0.05	0.15	余量	—
32	4047A	11.0～13.0	0.6	0.30	0.15	0.10	—	—	0.20	①	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
33	5A01	Si + Fe: 0.40		0.10	0.30～0.7	6.0～7.0	0.10～0.20	—	0.25	—	0.15	0.10～0.20	0.05	0.15	余量	LF15
34	5A02	0.40	0.40	0.10	或 Cr 0.15～0.40	2.0～2.8	—	—	—	Si + Fe: 0.6	0.15	—	0.05	0.15	余量	LF2
35	5A03	0.50～0.8	0.50	0.10	0.30～0.6	3.2～3.8	—	—	0.20	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LF3
36	5A05	0.50	0.50	0.10	0.30～0.6	4.8～5.5	—	—	0.20	—	—	—	0.05	0.10	余量	LF5
37	5B05	0.40	0.40	0.20	0.20～0.6	4.7～5.7	—	—	—	Si + Fe: 0.6	0.15	—	0.05	0.10	余量	LF10
38	5A06	0.40	0.40	0.10	0.50～0.8	5.8～6.8	—	—	0.20	Be: 0.000 1～0.005②	0.02～0.10	—	0.05	0.10	余量	LF6
39	5B06	0.40	0.40	0.10	0.50～0.8	5.8～6.8	—	—	0.20	Be: 0.000 1～0.005②	0.10～0.30	—	0.05	0.10	余量	LF14
40	5A12	0.30	0.30	0.05	0.40～0.8	8.3～9.6	—	0.10	0.20	Be: 0.005 Sb: 0.004～0.05	0.05～0.15	—	0.05	0.10	余量	LF12
41	5A13	0.30	0.30	0.05	0.40～0.8	9.2～10.5	—	0.10	0.20	Be: 0.005 Sb: 0.004～0.005	0.05～0.15	—	0.05	0.10	余量	LF13
42	5A30	Si + Fe: 0.40		0.10	0.50～1.0	4.7～5.5	—	—	0.25	Cr: 0.05～0.20	0.03～0.15	—	0.05	0.10	余量	LF16
43	5A33	0.35	0.35	0.10	0.10	6.0～7.5	—	—	0.50～1.5	Be: 0.000 5～0.005②	0.05～0.15	0.10～0.30	0.05	0.10	余量	LF33
44	5A41	0.40	0.40	0.10	0.30～0.6	6.7～7.0	—	—	0.20	—	0.20～0.10	—	0.05	0.10	余量	LT41
45	5A43	0.4	0.40	0.10	0.15～0.40	0.6～1.4	—	—	—	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	LF13
46	5A66	0.005	0.01	0.005	—	1.5～2.0	—	—	—	—	—	—	0.005	0.01	余量	LT66
47	5005	0.30	0.7	0.20	0.20	0.50～1.1	0.10	—	0.25	—	—	—	0.05	0.15	余量	—
48	5019	0.40	0.50	0.10	0.10～0.6	4.5～5.6	0.20	—	0.20	Mn + Cr: 0.10～0.6	0.20	—	0.05	0.15	余量	—
49	5050	0.40	0.7	0.20	0.10	1.1～1.8	0.10	—	0.25	-1	—	—	0.05	0.15	余量	—
50	5251	0.40	0.50	0.15	0.10～0.15	1.7～2.4	0.15	—	0.15	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
51	5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2～2.8	0.15～0.35	—	0.10	—	—	—	0.05	0.15	余量	—
52	5154	0.25	0.40	0.10	0.10	3.1～3.9	0.15～0.35	—	0.20	①	0.20	—	0.05	0.15	余量	—
53	5154A	0.50	0.50	0.10	0.50	3.1～3.9	0.25	—	0.20	Mn + Cr: 0.10～0.50①	0.20	—	0.05	0.15	余量	—
54	5454	0.25	0.40	0.10	0.50～1.0	2.4～3.0	0.05～0.20	—	0.25	—	0.20	—	0.05	0.15	余量	—
55	5554	0.20	0.40	0.10	0.50～1.0	2.4～3.0	0.05～0.20	—	0.25	①	0.05～0.20	—	0.05	0.15	余量	—

续表 4.7-2

序号	牌号	化学成分（质量分数）/%														新旧牌号对照
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn		Ti	Zr	其他		Al	
													单个	合计		
56	5754	0.40	0.40	0.10	0.50	2.6～3.6	0.30	—	0.20	Mn+Cr：0.10～0.6	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
57	5056	0.30	0.40	0.10	0.05～0.20	4.5～5.6	0.05～0.20	—	0.10	—	—	—	0.05	0.15	余量	LF5-1
58	5356	0.25	0.40	0.10	0.05～0.20	4.5～5.5	0.05～0.20	—	0.10	①	0.06～0.20	—	0.05	0.15	余量	—
59	5456	0.25	0.40	0.10	0.50～1.0	4.7～5.5	0.05～0.20	—	0.25	—	0.20	—	0.05	0.15	余量	—
60	5082	0.20	0.35	0.15	0.15	4.0～5.0	0.15	—	0.25	—	0.10	—	0.05	0.15	余量	—
61	5182	0.20	0.35	0.15	0.20～0.50	4.0～5.0	0.10	—	0.25	—	0.10	—	0.05	0.15	余量	—
62	5083	0.40	0.40	0.10	0.40～1.0	4.0～4.9	0.05～0.25	—	0.25	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	LT4
63	5183	0.40	0.40	0.10	0.50～1.0	4.3～5.2	0.05～0.25	—	0.25	①	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
64	5086	0.40	0.50	0.10	0.20～0.7	3.5～4.5	0.05～0.25	—	0.25	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
65	6A02	0.50～1.2	0.50	0.20～0.6	或 Cr 0.15～0.35	0.45～0.9	—	—	0.20	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LD2
66	6B02	0.7～1.1	0.40	0.10～0.40	0.10～0.30	0.40～0.8	—	—	0.15	—	0.01～0.04	—	0.05	0.10	余量	LD2-1
67	6061	0.40～0.8	0.7	0.15～0.40	0.15	0.8～1.2	0.04～0.35	—	0.25	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	LD30
68	6063	0.20～0.6	0.35	0.10	0.10	0.45～0.9	0.10	—	0.10	—	0.10	—	0.05	0.15	余量	LD31
69	6063A	0.30～0.6	0.15～0.35	0.10	0.15	0.6～0.9	0.05	—	0.15	—	0.10	—	0.05	0.15	余量	—
70	6070	1.0～1.7	0.50	0.15～0.40	0.40～1.0	0.50～1.2	0.25	—	0.10	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	LD2-2
71	7A04	0.50	0.50	1.4～2.0	0.20～0.6	1.8～2.8	0.10～0.25	—	5.0～7.0	—	0.10	—	0.05	0.10	余量	LC4
72	7A09	0.50	0.50	1.2～2.0	0.15	2.0～3.0	0.16～0.30	—	5.1～6.1	—	0.10	—	0.05	0.10	余量	LC9
73	7005	0.35	0.40	0.10	0.20～0.7	1.0～1.8	0.06～0.20	—	4.0～5.0	—	0.01～0.06	0.08～0.20	0.05	0.15	余量	—
74	7050	0.12	0.15	2.0～2.6	0.10	1.9～2.6	0.04	—	5.7～6.7	—	0.06	0.08～0.15	0.05	0.15	余量	—
75	7075	0.40	0.50	1.2～2.0	0.30	2.1～2.9	0.18～0.28	—	5.1～6.1	⑤	0.20	—	0.05	0.15	余量	—
76	7475	0.10	0.12	1.2～1.9	0.06	1.9～2.6	0.18～0.25	—	5.2～6.2	—	0.06	—	0.05	0.15	余量	—
77	8090	0.20	0.30	1.0～1.6	0.10	0.6～1.3	0.25	—	0.25	Li：2.2～2.7	0.10	0.04～0.16	0.05	0.15	余量	—

① 用于电焊条和堆焊时，w（Be）不大于0.0008%。
② 铍含量均按规定量加入，可不作分析。
③ 仅在供需双方商定时，对挤压和锻造产品限定 w（Ti+Zr）不大于0.20%。
④ 作铆钉线材的3A21合金的 w（Zn）应不大于0.03%。
⑤ 仅在供需双方商定时，对挤压和锻造产品限定 w（Ti+Zr）不大于0.25%。



表 4.7-3　铝及铝合金轧制板材力学性能

牌　号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_b/MPa	规定非比例伸长应力 $\sigma_{P_{0.2}}$/MPa	伸长率/% 5D	伸长率/% 50 mm
1070 1070A 1060	—	O	O	>0.2~0.3	55~95	—	—	≥15
				>0.3~0.5			—	≥20
				>0.5~0.8			—	≥25
				>0.8~1.3		≥15	—	≥30
				>1.3~10.0			—	≥35
1050 1050A 1145	—	O	O	>0.2~0.5	60~100	—	—	≥15
				>0.5~0.8			—	≥20
				>0.8~1.3		≥20	—	≥25
				>1.3~6.5			—	≥30
				>6.5~10.0			—	≥28
2014	工艺包铝	O	O	0.5~10.0	≤205	≤95	—	≥16
			T62	0.5	≥425	≥370	—	≥7
				>0.5~1.0	≥435	≥380	—	≥7
				>1.0~10.0	≥440	≥395	—	≥8
		T6	T6	0.5	≥425	≥370	—	≥7
				>0.5~1.0	≥435	≥380	—	≥7
				>1.0~10.0	≥440	≥390	—	≥8
		H112	T62	>4.5~12.5	≥440	≥395	—	≥8
				>12.5~25.0	≥460	≥405	≥5	—
				>25.0~40.0	≥460	≥405	≥3	—
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—
2A14	工艺包铝	O	O	0.5~10.0	≤245	—	—	≥10
		T6	T6	0.5~10.0	≥430	≥340	—	≥5
		H112	T62	>4.5~12.5	≥430	≥340	—	≥5
				>12.5~40.0	≥430	≥340	≥5	—
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—
2024	正常包铝或工艺包铝	O	O	0.5~1.6	≤205	≤95	—	≥12
				1.6~10.0	≤220	≤95	—	≥12
			T42	0.5~1.6	≥395	≥235	—	≥15
				>1.6~6.5	≥415	≥250	—	≥15
				>6.5~10.0	≥415	≥250	—	≥12
		T3	T3	0.5~1.6	≥405	≥270	—	≥15
				1.6~10.0	≥420	≥275	—	≥15
		T4	T4	0.5~1.6	≥400	≥245	—	≥15
				1.6~10.0	≥420	≥260	—	≥15
		H112	T42	>4.5~6.5	≥415	≥250	—	≥15
				>6.5~12.5	≥415	≥260	—	≥12
				>12.5~25.0	≥420	≥260	≥7	—
				>25.0~40.0	≥415	≥260	≥6	—
				>40.0~50.0	≥415	≥260	≥5	—
				>50.0~80.0	≥400	≥260	≥3	—
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—

续表 4.7-3

牌　号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_b/MPa	规定非比例伸长应力 $\sigma_{p0.2}$/MPa	伸长率/%	
							5D	50 mm
2A12	正常包铝或工艺包铝	O	O	0.5 ~ 4.5	≤215	—	—	≥14
				> 4.5 ~ 10.0	≤235		—	≥12
			T42	0.5 ~ 2.9	≥390	≥245	—	≥15
				> 2.9 ~ 10.0	≥410	≥265	—	≥12
		T3	T3	0.5 ~ 1.6	≥405	≥270	—	≥15
				1.6 ~ 10.0	≥420	≥275	—	≥15
		T4	T4	0.5 ~ 2.9	≥405	≥270	—	≥13
				> 2.9 ~ 4.5	≥425	≥275	—	≥12
				> 4.5 ~ 10.0	≥425	≥275	—	≥12
		H112	T42	> 4.5 ~ 10.0	≥410	≥265	—	≥12
				> 10.0 ~ 12.5	≥420	≥275	—	≥7
				> 12.5 ~ 25.0	≥420	≥275	≥7	—
				> 25.0 ~ 40.0	≥390	≥255	≥5	—
				> 40.0 ~ 70.0	≥370	≥245	≥4	—
				> 70.0 ~ 80.0	≥345	≥245	≥3	—
		F	—	> 4.5 ~ 150.0	—	—	—	—
3A21	—	O	O	2 ~ 0.8	100 ~ 150	—	—	≥19
				≥0.8 ~ 4.5			—	≥23
				≥4.5 ~ 10.0			—	≥21
		H14 H24	H14 H24	≥0.2 ~ 0.8	145 ~ 215	—	—	≥6
				≥0.8 ~ 1.3			—	≥6
				≥1.3 ~ 4.5			—	≥6
		H18	H18	≥0.2 ~ 0.5	≥185	—	—	
				≥0.5 ~ 0.8				
				≥0.8 ~ 1.3				
				≥1.3 ~ 4.5				
		H112	H112	≥0.5 ~ 10.0	≥110	—	—	≥16
				≥10.0 ~ 12.5	≥120		—	≥16
				≥12.5 ~ 25.0	≥120		≥16	—
				≥25.0 ~ 80.0	≥110		≥16	—
				≥4.5 ~ 150.0	—	—	—	—
5A02	—	O	O	> 0.5 ~ 1.0	165 ~ 225	—	—	≥17
				> 1.0 ~ 10.0			—	≥19
		H24	H14 H24 H34	> 0.5 ~ 1.0	≥255	—	—	≥4
				> 1.0 ~ 4.5			—	≥6
		H14	H18	> 0.5 ~ 1.0	≥265	—	—	≥3
				> 1.0 ~ 4.5			—	≥4
		H112	H112	> 4.5 ~ 12.5	≥175	—	—	≥7
				> 12.5 ~ 25.0	≥175	—	≥7	—
				> 25.0 ~ 150.0	≥155	—	≥6	—
		F	—	> 4.5 ~ 150.0	—	—	—	—



续表 4.7-3

牌号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_b/MPa	规定非比例伸长应力 $\sigma_{p0.2}$/MPa	伸长率/% 5D	伸长率/% 50 mm
5A03	—	O	O	0.5~4.5	≥195	≥100	—	≥16
		H14 H24 H34	H14 H24 H34	>0.5~4.5	≥225	≥195	—	≥8
		H112	H112	>4.5~10.0	≥185	≥80	—	≥16
				>10.0~12.5	≥175	≥70	—	≥13
				>12.5~25.0	≥175	≥70	≥13	—
				>25.0~50.0	≥165	≥60	≥12	—
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—
5A05	—	O	O	0.5~4.5	≥275	≥145	—	≥16
		H112	H112	>4.5~10.0	≥275	≥125	—	≥16
				>10.0~12.5	≥265	≥115	—	≥14
				>12.5~25.0	≥265	≥115	≥14	—
				>25.0~50.0	≥255	≥105	≥13	—
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—
5A06	工艺包铝	O	O	0.5~4.5	≥315	≥155	—	≥16
		H112	H112	>4.5~10.0	≥315	≥155	—	≥16
				>10.0~12.5	≥305	≥145	—	≥12
				>12.5~25.0	≥305	≥145	≥12	—
				>25.0~50.0	≥295	≥135	≥6	—
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—
5005	—	O	O	0.5~0.8	105~145	≥35	—	≥16
				>0.8~1.3			—	≥19
				>1.3~6.5			—	≥21
				>6.5~10.0			—	≥22
		H12 H32	H12 H32	0.5~0.8	125~165	≥95	—	≥3
				>0.8~1.3			—	≥4
				>1.3~4.5			—	≥7
		H14 H34	H14 H34	0.5~0.8	145~185	≥115	—	≥2
				>0.8~1.3			—	≥2
				>1.3~4.5			—	≥3
		H16 H36	H16 H36	0.5~0.8	165~205	≥135	—	≥1
				>0.8~1.3			—	≥2
				>1.3~4.5			—	≥3
		H18 H38	H18 H38	0.5~0.8	≥185	—	—	≥1
				>0.8~1.3			—	≥2
				>1.3~4.5			—	≥3
		H112	H112	>4.5~12.5	≥115	—	—	≥8
				>12.5~40.0	≥105		≥10	—
				>40.0~80.0	≥100		≥16	—
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—



续表 4.7-3

牌号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度 /mm	抗拉强度 σ_b/MPa	规定非比例伸长应力 $\sigma_{P_{0.2}}$/MPa	伸长率/%	
							5*D*	50 mm
5083	—	O	O	0.5~4.5	275~350	125~200	—	≥16
		H112	H112	>4.5~6.5	≥275	≥125	—	≥11
				>6.5~12.5	≥275	≥125	—	≥12
				>12.5~40.5	≥275	≥125	≥10	—
				>40.0~50.0	≥270	≥115	≥10	—
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—
5086	—	O	O	0.5~1.3	240~305	≥95	—	≥16
				>1.3~4.5			—	≥18
		H112	H112	>4.5~12.5	≥250	≥125	—	≥8
				>12.5~40.0	≥240	≥105	≥9	—
				>40.0~50.0	≥235	≥95	≥12	—
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—
6A02	—	O	O	0.5~4.5	≤145	—	—	≥21
				>4.5~10.0			—	≥16
			T62	0.5~4.5	≥295	—	—	≥11
				>4.5~10.0			—	≥8
		T4	T4	0.5~0.8	≥195	—	—	≥19
				>0.8~2.9			—	≥21
				>2.9~4.5			—	≥19
				>4.5~10.0	≥175		—	≥17
		T6	T6	0.5~4.5	≥195	—	—	≥11
				>4.5~10.0			—	≥8
		H112	T62	>4.5~12.5	≥295	—	—	≥8
				>12.5~25.0	≥295		≥7	—
				>25.0~40.0	≥285		≥6	—
				>40.0~80.0	≥275		≥6	—
			T42	>4.5~12.5	≥175	—	—	≥17
				>12.5~25.0	≥175		≥14	
				>25.0~40.0	≥165		≥12	—
				>40.0~80.0	≥165		≥10	—
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—
7075	正常包铝或工艺包铝	O	O	0.5~1.6	≤250	≤140	—	≥10
				1.6~10.0	≤270	≤145	—	≥10
			T62	0.5~1.0	≥485	≥415	—	≥7
				>1.0~1.6	≥495	≥425	—	≥8
				>1.6~4.5	≥505	≥435	—	≥8
				>4.5~6.5	≥515	≥440	—	≥8
				>6.5~10.0	≥515	≥445	—	≥9
		T6	T6	0.5~1.0	≥485	≥415	—	≥7
				>1.0~1.6	≥495	≥425	—	≥8
				>1.6~6.5	≥505	≥435	—	≥8
				>6.5~10.0	≥515	≥445	—	≥9



续表 4.7-3

牌　号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度 /mm	抗拉强度 σ_b/MPa	规定非比例伸长应力 $\sigma_{P_{0.2}}$/MPa	伸长率/%	
							5*D*	50 mm
7075	正常包铝或工艺包铝	H112	T62	>4.5~6.5	≥515	≥440	—	≥8
				>6.5~12.5	≥515	≥445	—	≥9
				>12.5~25.0	≥540	≥470	≥6	—
				>25.0~40.0	≥530	≥460	≥5	—
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—

表 4.7-4　铸造铝合金化学成分

序号	合金牌号	合金代号	主要元素（质量分数）/%							
			Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	其他	Al
1	ZAlSi7Mg	ZL101	6.5~7.5		0.25~0.45					余量
2	ZAlSi7MgA	ZL101A	6.5~7.5		0.25~0.45			0.08~0.20		余量
3	ZAlSi12	ZL102	10.0~13.0							余量
4	ZAlSi9Mg	ZL104	8.0~10.5		0.17~0.35		0.2~0.5			余量
5	ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	4.5~5.5	1.0~1.5	0.4~0.6					余量
6	ZAlSi5CulMgA	ZL105A	4.5~5.5	1.0~1.5	0.4~0.55					余量
7	ZAlCu5Mn	ZL201		4.5~5.3			0.6~1.0	0.15~0.35		余量
8	ZAlCu4	ZL203		4.0~5.0						余量
9	ZAlMg10	ZL301			9.5~11.0					余量
10	ZAlMg5Si1	ZL303	0.8~1.3		4.5~5.5		0.1~0.4			余量
11	ZAlZn11Si7	ZL401	6.0~8.0		0.1~0.3	9.0~13.0				余量

表 4.7-5　铸造铝合金杂质允许含量

序号	合金牌号	合金代号	杂质含量（质量分数）/%≤															
			Fe		Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Zr	Ti+Zr	Be	Ni	Sn	Pb	杂质总和	
			S	J													S	J
1	ZAlSi7Mg	ZL101	0.5	0.9		0.2		0.3	0.35			0.25	0.1		0.01	0.05	1.1	1.5
2	ZAlSi7MgA	ZL101A	0.2	0.2		0.1		0.1	0.10		0.20				0.01	0.03	0.7	0.7
3	ZAlSi12	ZL102	0.7	1.0		0.30	0.20	0.1	0.5	0.20							2.0	2.2
4	ZAlSi9Mg	ZL104	0.6	0.9		0.1		0.25				0.15			0.01	0.05	1.1	1.4
5	ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	0.6	1.0				0.3	0.5			0.15	0.1		0.01	0.05	1.1	1.4
6	ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	0.2	0.2				0.1	0.1						0.01	0.05	0.5	0.5
7	ZAlCu5Mn	ZL201	0.25	0.3	0.3		0.05	0.2			0.2			0.1			1.0	1.0
8	ZAlCu4	ZL203	0.8	0.8	1.2		0.05	0.25	0.1	0.20	0.1				0.01	0.05	2.1	2.1
9	ZAlMg10	ZL301	0.3	0.3	0.30	0.10		0.15	0.15	0.15	0.20		0.07	0.05	0.01	0.05	1.0	1.0
10	ZAlMg5Si1	ZL303	0.5	0.5		0.1		0.2		0.2							0.7	0.7
11	ZAlZn11Si7	ZL401	0.7	1.2		0.6			0.5								1.8	2.0

注：S—砂型铸造；J—金属型铸造。

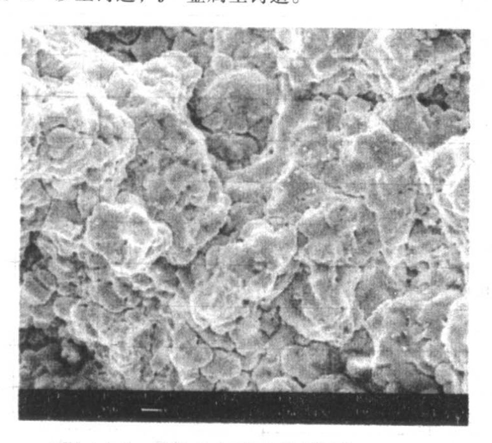


图 4.7-1　铝合金焊接结晶裂纹断口形貌

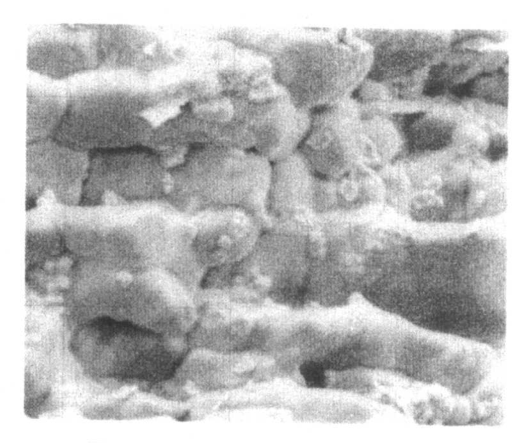


图 4.7-2　铝合金焊接液化裂纹断口形貌





图 4.7-3　铝合金焊接存放裂纹断口形貌

2）焊接裂纹敏感性试验方法　铝及铝合金焊接裂纹敏感性试验推荐采用"鱼骨形"试样、"十字搭接"试样，或"T形接头"试样，见图 4.7-4、图 4.7-5、图 4.7-6。"鱼骨形"试样中 A 方向为焊接方向。"十字搭接"试样中的 1、2、3、4 为焊接顺序，箭头为焊接方向。

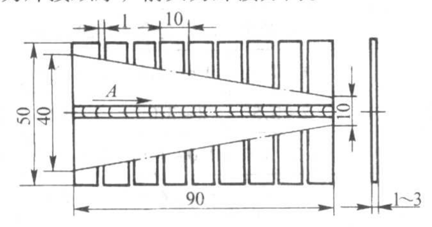


图 4.7-4　"鱼骨形"试样

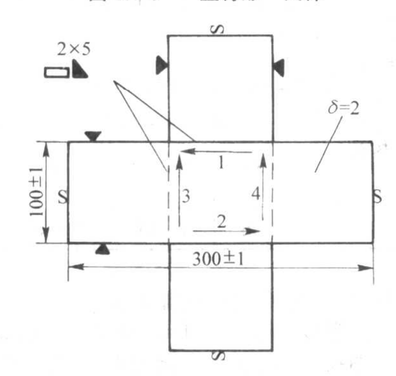


图 4.7-5　"十字搭接"试样

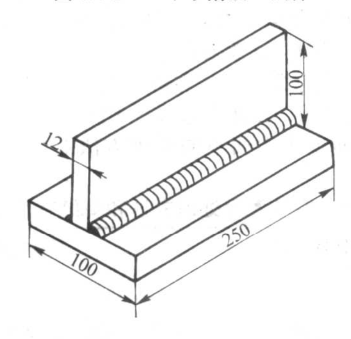


图 4.7-6　"T形接头"试样

焊后分别测量结晶裂纹长度和液化裂纹长度，注意测量单条焊缝上的裂纹长度时应从正、反两面进行，取数值较大者。结晶裂纹率 K_1 和液化裂纹率 K_2 的计算公式为：

$$K_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} H_i}{\sum_{i=1}^{n} L_i} \qquad K_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} R_i}{\sum_{i=1}^{n} L_i} \qquad (4.7\text{-}1)$$

式中，H_i 为第 i 条焊缝上的结晶裂纹率长度，mm；R_i 为第 i 条焊缝上的液化裂纹长度，mm；L_i 为第 i 条焊缝的长度，mm；n 为焊缝总条数；K_1 为结晶裂纹率，%；K_2 为液化裂纹率，%；焊接裂纹敏感性满足工程要求的判据是：

$$K_1 < 10\%$$
$$K_2 = 0 \qquad (4.7\text{-}2)$$

满足此判据说明焊接裂纹敏感性满足工程要求。

当焊接结构条件复杂或材料焊接裂纹敏感性较大或设计技术要求较高时，应进行结构试验件或缩比试验件的焊接试验，对材料裂纹敏感性和适用性作出确切评价，以评判裂纹敏感性是否满足工程要求。

3）合金元素对焊接裂纹的影响　铜 Al－Cu 系合金中，含铜量为 5.8%～6.8% 的 2219 合金裂纹敏感性低，而含铜约 4% 再加上镁、硅等元素形成低熔共晶物的 2024 合金，裂纹敏感性高。

硅　Al－Si 系合金裂纹敏感性极低。

镁　Al－Mg 系合金中含镁量低时裂纹敏感性较大，含镁量高时裂纹敏感性较小，5A03（LF3）、5A05（LF5）、5A06（LF6）、5B06（LF14）裂纹敏感性较小，5A02（LF2）裂纹敏感性较大。Al－Mg－Si 系除 6A02（LD2）外，裂纹敏感性较大。

锌　Al－Zn 系合金除 7005 和 7039 外，裂纹敏感性均较大。

钛和硼　钛是铝合金中常用的添加元素，以 Al－Ti 或 Al－Ti－B 中间合金形式加入，Ti 的临界含量为 0.15%。Ti 和 Al 形成 $TiAl_2$ 相，成为结晶时的非自发结晶核心，细化焊缝组织，降低焊接裂纹敏感性。B 加强 Ti 的晶粒细化效果，B 含量应控制在 0.01% 以下，过高会引起焊缝气孔。

锆　锆是铝合金中常用的添加元素，锆和铝形成 $ZrAl_3$ 化合物，细化焊缝金属组织，降低焊接裂纹敏感性，但比钛的效果小。有锆存在时，会降低 Ti＋B 的作用效果。

钒　钒和铝形成 VAl_{11} 难溶化合物，细化焊缝组织，降低焊接裂纹敏感性，但比钛和锆的作用小。

钪　钪是铝合金的强晶粒细化剂，在 Al-Mg 系合金中表现突出。采用 2319 焊丝焊接 2618 铝铜合金裂纹敏感性很大，在母材和焊丝中同时加入钪，明显改善合金的裂纹敏感性。采用 5000 系铝合金焊丝焊接 7000 系铝合金时，裂纹敏感性极大，认为是不可焊的，在焊丝中加入钪后，裂纹敏感性大大减少。

铁和硅　铁在 Al-Cu-Mg-Ni-Fe 系铝合金中，硅在 Al-Si 和 Al-Mg-Si 系铝合金中是以合金元素加入的，在其他铝合金中，铁和硅是常见的杂质元素，对合金性能有明显影响。主要以 $FeAl_3$ 和游离 Si 存在。当硅大于铁时，形成 β-$FeSiAl_5$（或 $Fe_2Si_2Al_9$）相，当铁大于硅时，形成 α-Fe_2SiAl_8 相。当 Fe 和 Si 比例不当时会增加焊接裂纹敏感性，Fe 含量高时会使焊缝组织产生脆性。

钠　钠在铝中几乎不溶解，最大固溶度小于 0.002 5%，熔点低（97.8℃），凝固过程中吸附在枝晶表面或晶界，形成液态钠吸附层，产生脆性开裂，增加焊接裂纹敏感性。在含硅的铝合金中，硅和钠形成 NaAlSi 化合物，无游离钠存在，不会增加焊接裂纹敏感性。在铝镁合金中，当镁含量超过 2% 时，镁夺取硅，析出游离钠，会增加焊接裂纹敏感性。

（3）焊缝气孔

焊缝气孔是铝及铝合金焊接的常见缺陷。铝及铝合金牌号不同，焊缝气孔敏感性不同，但都可能产生焊缝气孔。

1）焊缝气孔分类和特征　在焊缝长度方向上，焊缝气孔可分为单个气孔、密集气孔、链状气孔。在焊缝横截面内，焊缝气孔可分为弥散气孔、根部气孔、熔合线气孔。熔



合线气孔可分为熔合线内部气孔和熔合线表面气孔。

单个气孔是指呈单个状，任何两个相邻气孔的间距不小于气孔直径平均值3倍的气孔。

密集气孔是指呈聚集状，数量众多，任何两个相邻气孔的间距小于气孔直径平均值3倍的小气孔群。

链状气孔是指大体上分布在一条近似的直线上，数量不小于3个，任何两个相邻气孔的间距小于气孔直径平均值3倍的气孔。图4.7-7为2195铝合金氩弧焊时熔合线链状表面气孔。在扫描电镜下观察焊缝气孔形貌，气孔壁呈树枝状结晶的枝晶端头紧密排列，表面光滑、洁净、无氧化痕迹，见图4.7-8。

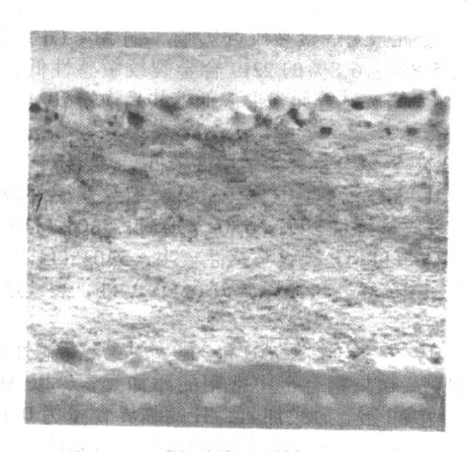


图4.7-7 铝合金熔合线链状表面气孔

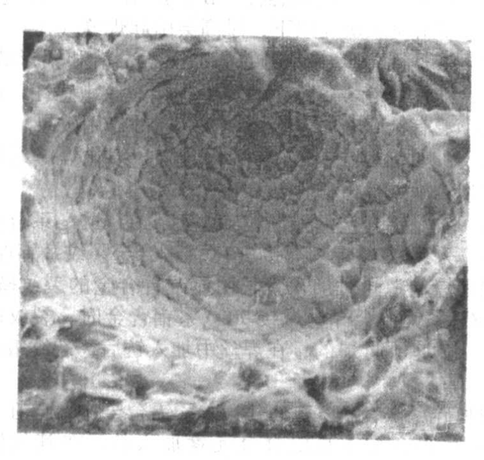


图4.7-8 铝合金焊缝气孔形貌

2）焊缝气孔形成机理 从铝及铝合金焊缝气孔内直接抽取气体分析证实，气孔内的成分主要为氢。

液态铝合金中氢的溶解度为0.46 μL/L，固态铝合金中氢的溶解度为0.03 μL/L，二者相差约15倍。焊接熔池中液态金属吸收周围的氢，焊缝金属凝固时，超过溶解度的氢析出、长大、聚集，来不及逸出，形成焊缝气孔。有时在熔合线外侧发现气孔，见图4.7-9，这种气孔是由于母材内部氢含量较高，焊接过程中母材受热氢发生聚集形成的。

焊接过程中确定氢源，控制熔池吸氢量是减少或者消除焊缝气孔的关键。

3）焊接气孔影响因素 影响铝及铝合金焊缝气孔的因素有：表面清理质量、焊接参数、保护气体纯度、环境温度和湿度、焊接位置、母材和焊丝氢含量等。

表面清理 表面清理效果和清理后被焊件表面微观状态有关。采用刷子和化铣方法表面微观凸起增加很多，使表面易吸湿气，机械加工方法表面微观凸起最小，效果最好。表4.7-6列出了不同合金不同处理方法表面微观凸起值，表面微观凸起值越小，表面清理效果越好。

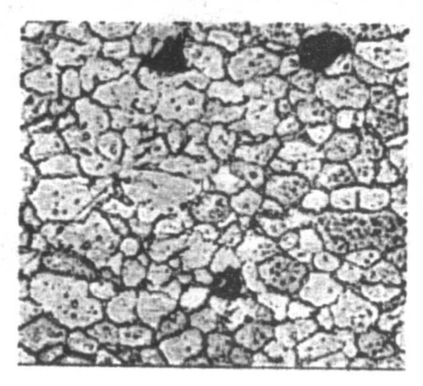


图4.7-9 铝合金熔合线外侧气孔

表4.7-6 铝合金表面不同处理方法表面微观凸起值

表面清理方法	表面微观凸起值/μm			
	5A06合金	2219合金	1420合金	1460合金
除油	1~1.5	0.8~1.5	1.2~3.0	1.0~2.5
化学腐蚀	2~3.5	2~3.0	3~4.5	2.5~4.0
化学抛光	1.2~1.9	1.0~1.8	1.9~3.2	1.5~2.7
化铣	4.5~6.0	5.0~6.5	6~7.5	5.5~7.0
机铣（转速1 000~2 000 r/min）	2~3.5	2~3.0	2.5~4.0	2~3.5
机铣（转速5 000~10 000 r/min）	1.2~1.3	1.2~1.3	1.35~1.5	1.25~1.5
化学腐蚀+热真空除气	2~3.5	2~3.0	3~4.5	2.5~4.0
旋转刷	8~16	6~14	7~16	6.5~15

热真空除气是将被焊件放在真空加热炉中，在一定真空度下加热到一定温度保温一定时间，将焊件中的氢气去除的方法。加热到200~300℃时，去除表面吸附的湿气；450~550℃时去除氢氧化物AlOH、LiOH、MgOH中的氢；650~700℃去除溶解在金属中的氢。热真空除气对Al-Mg、Al-Mg-Li、Al-Cu-Li、Al-Mg-Cu效果良好，对Al-Cu-Mn系效果较差。

表面处理过的焊件，放在潮湿的气氛中，1420合金和5083合金吸气严重，1201合金吸气不严重。

表4.7-7列出了表面不同处理方法焊接时焊缝气孔情况。

表4.7-7 焊前表面处理方法和焊缝气孔的关系

	表面处理方法	焊缝缺陷
1	化学处理	大小连续气孔、氧化夹渣
2	机械铣削+化学处理	多个气孔、少量夹渣
3	机械铣削+四氯化碳擦净	气孔少于第一种方法、出现变色
4	机械铣削后无任何后继处理	基本无气孔、偶尔出现微气孔

对焊缝质量仅作一般要求时，可采用化学表面处理方法，焊缝质量要求较高时，应选用机械表面处理技术。

焊接时周围环境的湿度应控制在60%~65%，温度23℃±2℃。

母材内部氢 铝及铝合金在熔铸过程中吸收、未被去除、



保留在铸锭中的固态氢构成母材内部氢，是熔池中氢的来源之一，母材内部氢含量较高时，通过焊接工艺方法无法完全消除焊缝气孔。用于焊接的铝及铝合金内部氢含量一般应控制在 0.33×10^{-6}以下，对于 2219 合金内部氢含量应控制在 0.16×10^{-6}以下。

母材表面富氢层　铝合金铸锭在空气中热轧成板材时，板材表面吸收空气中的水分，形成表面富氢层。表面富氢层焊前应去除。

塑性变形层吸氢　机械加工焊接坡口在铝合金坡口表面上形成塑性变形层，变形层内部会形成许多细微孔洞，增大铝合金对氢的吸收和溶解能力。在氢氧化钠槽液中进行化学处理时，为塑性变形层吸氢提供充足的氢源。

氧化膜中的水合物　铝合金经 $NaOH+HNO_3$ 处理后，表面出现一层不规则的氧化膜。氧化膜厚度为 1 00 ~ 1 000 nm，质地疏松，表面有凹坑和龟裂，含水量达 0.7 μg/cm²。根据计算，焊缝结合面上 1 μg/cm² 的水在电弧作用下可在熔池内形成 0.7×10^{-6}的氢，氧化膜中的水合物将使熔池内的氢含量大 0.5×10^{-6}。

焊缝结合面触摸污染　焊前铝合金构件要经过装配、锉修、擦拭等多道加工工序，由于工艺规程不合理或者工人操作不当，极易造成手对焊缝结合面的触摸，使焊缝结合面受汗迹、油脂或纤维等碳氢化合物污染。铝合金表面的碳氢化合物在电弧作用下若能释放出 250×10^{-6}的氢，就会造成焊缝气孔。一个指痕的氢释放量约为 700×10^{-6}，使用干净手套触摸焊缝结合面所留痕迹的氢释放量约为 400×10^{-6}。

焊接位置　水平位置施焊、向上爬坡焊、向上立焊利于消除焊缝气孔。仰焊、下坡焊、横焊易形成焊缝气孔。

焊丝　焊丝内部氢含量和表面状况对焊缝气孔有重要影响。焊丝内部氢含量要求和母材相同。手工焊时焊丝焊前须酸洗 + 机械刮削。自动焊时普通焊丝仅能进行酸洗，无法刮削，对焊缝气孔产生不利影响。推荐采用光亮焊丝。

(4) 近缝区软化

焊接热处理强化和冷作硬化的铝及铝合金时，近缝区母材的热处理强化和冷作硬化作用减弱或消失，焊接线能量越大，性能降低的程度越大。2A14 合金 T6 态时，母材强度为 441 MPa，氩弧焊接头焊后态的拉伸强度约为 270 ~ 330 MPa，接头强度系数为 0.61 ~ 0.75。

解决铝及铝合金近缝区软化的措施有：①焊后热处理；②局部补强；③随焊碾压。焊后热处理是指焊接完毕后通过热处理的方法使焊接过程中减弱或消失的热处理强化效果得到一定恢复。热处理规范一般采取母材本身相应的热处理规范，适合于小型焊件，易造成较大变形，注意适用性。局部补强是指局部加厚焊接部位的母材厚度，使总承载能力达到设计要求，适合于中大型构件。随焊碾压是指在焊接过程中对焊缝及近缝区实施碾压，改善接头性能的方法，仅适合于自动焊，不适合于手工焊，应用受到很大限制。

(5) 工艺性缺陷

铝及铝合金焊接工艺性缺陷包括：未熔合、未焊透、咬边、钨夹杂和氧化夹杂等缺陷。工艺性缺陷占焊接缺陷总数的比例最大。某大型铝合金箱体焊接质量复查时发现，总计 123 处焊接缺陷中，有夹渣 53 处、夹钨 6 处、未焊透 32 处、未熔合 3 处、焊缝气孔 23 处、裂纹 5 处，焊接工艺性缺陷占缺陷总数的 77.2%。

未熔合是指在焊缝金属和母材之间或焊道和焊道金属之间未完全熔化结合的部分，有侧壁未熔合、层间未熔合和焊缝根部未熔合三种。铝及铝合金焊接小于 6 mm 的薄板极少出现未熔合，厚板多层焊易出现未熔合。影响未熔合的因素有：焊接规范、坡口形状、焊枪工作位置及角度。防止铝及铝合金焊接未熔合的措施有：①选择合适的焊接电流；②坡口角度在可能范围内要大些，清根加工时尖端半径要大；③焊枪应对中，层间采用摆动焊接法；④熔化极焊接时氧化膜应清理干净。

未焊透是指焊缝根部未完全熔透的现象。防止未焊透的措施有：①选择合适的焊接规范；②坡口形状合适；③两面焊一定在清根后焊接另一面。

咬边是指因焊接造成的焊趾或焊根处的沟槽，可能是连续的，也可能是间断的。防治咬边的措施有：①不采用立焊或横焊；②选择合适的焊接规范；③焊枪角度和运行正确。

钨夹杂是指残留在焊缝金属中来自外部的钨颗粒。钨极和被焊母材接触或焊接电流超过钨极允许电流的名义值造成钨极熔化进入熔池所致。钨夹杂的防治措施：①按使用的焊接电流值选择钨极；②钨极伸出长度不要过大。

氧化夹杂是指凝固过程中在焊缝金属中残留的 Al_2O_3 氧化膜。氧化夹杂的防治措施有：①焊前去除干净母材和焊丝表面的氧化膜；②多层焊时，做好层间清理。

(6) 时效变形

尺寸精度要求较高的大型构件，焊后经校形合格，存放一段时间后，尺寸超差，这种现象叫时效变形。铝及铝合金焊后时效变形的规律是继续增加原有焊接变形，钢焊后时效变形是减少已有焊接变形。造成铝合金时效变形的原因是焊接残余应力和接头组织变化和不稳定相析出。5A06 铝合金大型构件熔焊时冷却速度快，生成不稳定的 α 过饱的固溶体，随后逐渐析出 β 相，β 相的晶格常数小于 α 相，焊接收缩增加。一般 100 h 后趋于缓和。

防治时效变形方法有：热处理和振动处理。炉中热处理对于大型构件困难，采取“水煮法”，沸水中煮 2 h，降低焊接残余应力和促进不稳定相析出，降低时效变形 70%。振动处理降低焊接残余应力，促进过饱和相分解，提高尺寸稳定性，是一种简单易行，低成本方法。应注意，振动处理会使结构中的焊接微裂纹扩展，增加结构危险性。

1.2.2 焊接材料

铝及铝合金焊接材料包括铝及铝合金原材料、焊丝、焊条、焊剂、钨极、保护气体。

(1) 原材料选择

工业纯铝　工业纯铝强度低，但塑性、耐蚀性、焊接性好，可用各种熔焊方法焊接。变形强化工业纯铝焊后近缝区发生软化。焊接接头强度可达退火状态母材强度的 90%。

铝-锰合金　铝锰合金不能热处理强化，可变形强化。强度比纯铝略高，成形性、耐蚀性、焊接性好。可用各种熔焊方法焊接。变形强化铝 - 锰合金焊后近缝区发生软化。焊接接头强度可达退火状态母材强度的 90%。

铝-镁合金　铝-镁合金不能热处理强化，可变形强化。镁含量为 0.5% ~ 7.0%。铝镁合金中等强度、塑性、焊接性、耐蚀性良好。可用各种熔焊方法焊接。镁含量超过 5%，耐蚀性明显降低，超过 7% 对应力集中、应力腐蚀敏感性较大。焊接接头强度可达退火状态母材强度的 80% ~ 90%。

铝-硅合金　铝硅合金强度不高，液态流动性好，焊接性好，一般作为铸造铝合金或用作焊丝。

铝-硅-镁合金　铝-硅-镁合金可热处理强化，中等强度，成形性、耐蚀性良好，有一定的裂纹敏感性。可用各种熔焊方法焊接。焊接和热处理组合有两种方案：第一方案为母材在固溶 + 人工时效状态下焊接，接头抗拉强度不低于母材强度的 70%。第二方案为母材在固溶状态下焊接，焊后进行人工时效，接头抗拉强度不低于固溶 + 人工时效状态母材强度的 85% ~ 90%。第二方案母材焊前强度较低，塑性好，焊接拘束度较低，焊接裂纹敏感性较小，如果结构允许进行焊后热处理，推荐采用第二方案。

铝-铜合金　铝铜合金又称硬铝，可热处理强化，具有较高



的室温强度、高温强度、低温强度和超低温强度。铝铜系合金中多数合金焊接性不好，如 2A02、2A14 合金，在热处理强化状态下焊接时易产生焊接结晶裂纹、液化裂纹和存放裂纹。接头强度达到母材强度的 60%～70%。部分合金焊接性良好，如 2A16、2B16 和 2219 合金，可用各种熔焊方法焊接。接头强度达到母材强度的 60%～70%。为满足结构强度要求，可实行局部厚度补强。接头断裂韧度高，超低温性能好，当温度降低时母材和接头的强度和塑性有所提高。

铝-锌-镁-铜合金　铝-锌-镁-铜合金又称超硬铝，可热处理强化，强度很高，对应力集中和应力腐蚀敏感性较大。铝-锌-镁-铜合金系多数合金焊接性不好，一般不用于焊接结构。当锌＋镁含量之和在 5.5%～7.0%范围内，不含铜或铜含量较低时（0.1%～0.2%），合金焊接性较好，应力腐蚀倾向不明显，接头力学性能较好。对于 Al-Zn-Mg 合金，Zn＋Mg 含量小于且接近 6%时，同时 Zn/Mg≈2.7 时抗应力腐蚀性能最好。合金淬火时对冷却速度不敏感，熔焊过程的冷却速度相当于焊接接头的淬火速度，熔焊过程相当于固溶处理过程，焊后存放过程相当于自然时效过程，存放三个月后焊接接头强度自动恢复到接近热处理强化状态母材的强度。

铝-锂合金　铝锂合金可热处理强化，密度低，比强度和比刚度高，低温性能、耐蚀性、超塑性能好。用铝锂合金取代常规铝合金可使结构质量减轻 10%～15%，刚度提高 15%～20%。1420 合金焊接性较好，裂纹敏感性较低，气孔敏感性较大，接头强度系数为 0.70。1460 合金焊接性较好，采用 1217 焊丝（Al－12Cu－Sc－Ti－Zr）焊接裂纹敏感性较低，焊缝气孔敏感性较小，接头强度系数为 0.78。W049 合金焊接性尚好。2091、2195、8090 铝合金焊接裂纹敏感性较大。

异种铝及铝合金组合　一个复杂焊接结构，经常需要由不同特性的零件组成。不同牌号的铝及铝合金组合焊接时，焊接性表现较为复杂。有些组合，例如 5A05（LF5）与 5A06（LF6）组合，焊接性尚好；有些组合，例如，2A16（LY16）与 1060（L2）、5A03（LF3）、5A05（LF5）、5A06（LF6）组合，各自的焊接性好，组合焊接性变坏。实际工作中应根据结构、材料、工艺情况，进行专项试验研究，评定焊接性，确定焊接技术措施。

（2）焊丝和焊条的选择

铝合金牌号选定以后，应选择配用焊丝或焊条。

按我国国标 GB/T 3669—1983 和 GB 10858—1989，焊丝分为电焊条芯和焊丝两类。按美国国标 ANSI/AWSA5.10—92，焊丝分为电极丝（代号 E）、填充丝（代号 R）和两者兼用丝（代号 ER），实际上分为 R 和 ER 两类。

焊丝是影响焊接接头成分、组织、液相线温度、固相线温度、焊接裂纹敏感性、耐蚀性和常温或高低温力学性能的重要因素。当铝合金焊接性不好、接头力学性能较低或焊接结构出现脆性断裂时，不改变焊件设计和工艺条件，选用适当焊丝是获得满意焊接接头的可行和有效的技术措施。

我国焊条芯和焊丝的化学成分见表 4.7-8、表 4.7-9、表 4.7-10，国外焊丝见表 4.7-11。

表 4.7-8　我国铝及铝合金电焊条芯的化学成分
（摘自 GB/T 3669—2001）

型号	化学成分（质量分数）/%						
	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Al	其他元素总量
TAl	≤0.5	≤0.5	≤0.20	≤0.05	≤0.1	99.5	≤0.15
TAlSi	4.5～6.0	≤0.8	≤0.3	≤0.05	≤0.1	余量	≤0.15
TAlMn	≤0.5	≤0.5	≤0.20	1.0～1.5	≤0.1	余量	≤0.15

表 4.7-9　我国铝及铝合金焊丝的化学成分（摘自 GB/T 10858—1989）

类别	型号	化学成分（质量分数）/%											
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	V	Zr	Al	其他元素总量
纯铝	SAl－1	Fe＋Si 1.0		0.05	0.05	—		0.10	0.05	—	—	≥99.0	
	SAl－2	0.20	0.25	0.40	0.30	0.03	—	0.04	0.03	—	—	≥99.7	
	SAl－3	0.30	0.30	—	—	—		—	—	—	—	≥99.5	
铝镁	SAlMg－1	0.25	0.40	0.10	0.50～1.0	2.40～3.0	0.05～0.20	—	0.05～0.20	—	—		
	SAlMg－2	Fe＋Si 0.45		0.05	0.01	3.10～3.90	0.15～0.35	0.20	0.05～0.15	—	—		
	SAlMg－3	0.40	0.40	0.10	0.50～1.0	4.30～5.20	0.05～0.25	0.25	0.15	—	—		
	SAlMg－5	0.40	0.40	—	0.20～0.60	4.70～5.70		—	0.05～0.20	—	—	余量	0.15
铝铜	SAlCu	0.20	0.30	5.8～6.8	0.20～0.40	0.02		0.10	0.10～0.20	0.05～0.15	0.10～0.25		
铝锰	SAlMn	0.60	0.70	—	1.0～1.6	—	—	—	—	—	—		
铝硅	SAlSi－1	4.5～6.0	0.80	0.30	0.05	0.05		0.10	0.20	—	—		
	SAlSi－2	11.0～13.0	0.80	0.30	0.15	0.10		0.20	—	—	—		

注：除规定外，单个数值表示最大值。

表 4.7-10　我国企业标准铝合金焊丝的化学成分

类别	牌号及标准	化学成分（质量分数）/%								
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti、Zr、V、B	Al	其他元素总量
铝镁	LF14	0.40	0.40	0.10	0.5～0.8	5.8～6.8	0.20	Bi：0.10～0.30	余量	0.10
铝硅铜	BJ380A Q/YSR013－92	4.2～5.7	0.30	1.3～2.3	≤0.05	≤0.05	≤0.10	Ti：0.05～0.25； B：0.01～0.05	余量	0.15

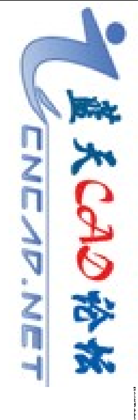


表 4.7-11　美国铝及铝合金标准焊丝的化学成分（摘自 ANSI/AWS A5.10—1992）

焊丝型号	化学成分（质量分数）/%①②												国内外焊丝型号对照
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	其他元素 单个	其他元素 总量	Al	
ER1100	③	③	0.05~0.20	0.05	—	—	—	0.10	—	0.05④	0.10	99.0 min⑤	
R1100	③	③	0.05~0.20	0.05	—	—	—	0.10	—	0.05④	0.10	99.0 min⑤	
ER1188⑥	0.06	0.06	0.005	0.01	0.01	—	—	0.03	0.01	0.01④	—	99.88 min⑤	
R1188⑥	0.06	0.06	0.005	0.01	0.01	—	—	0.03	0.01	0.01④	—	99.88 min⑤	
ER2319⑦	0.20	0.30	5.8~6.8	0.20~0.40	0.20	—	—	0.10	0.10~0.20	0.05④	0.15	余量	SAlCu
R2319⑦	0.20	0.30	5.8~6.8	0.20~0.40	0.20	—	—	0.10	0.10~0.20	0.05④	0.15	余量	
ER4009	4.5~5.5	0.20	1.0~1.5	0.10	0.45~0.6	—	—	0.10	0.20	0.05④	0.15	余量	
R4009	4.5~5.5	0.20	1.0~1.5	0.10	0.45~0.6	—	—	0.10	0.20	0.05④	0.15	余量	
ER4010	6.5~7.5	0.20	0.20	0.10	0.30~0.45	—	—	0.10	0.20	0.05④	0.15	余量	
R4010	6.5~7.5	0.20	0.20	0.10	0.30~0.45	—	—	0.10	0.20	0.05④	0.15	余量	
R4011i	6.5~7.5	0.20	0.20	0.10	0.45~0.7	—	—	0.10	0.04~0.20	0.05	0.15	余量	
ER4043	4.5~6.0	0.8	0.30	0.05	0.05	—	—	0.10	0.20	0.05④	0.15	余量	SAlSi-1
R4043	4.5~6.0	0.8	0.30	0.05	0.05	—	—	0.10	0.20	0.05④	0.15	余量	
ER4047	11.0~13.0	0.8	0.30	0.15	0.10	—	—	0.20	—	0.05④	0.15	余量	SAlSi-2
R4047	11.0~13.0	0.8	0.30	0.15	0.10	—	—	0.20	—	0.05④	0.15	余量	
ER4145	9.3~10.7	0.8	3.3~4.7	0.15	0.15	0.15	—	0.20		0.05④	0.15	余量	
R4145	9.3~10.7	0.8	3.3~4.7	0.15	0.15	0.15	—	0.20		0.05④	0.15	余量	
ER4643	3.6~4.6	0.8	0.10	0.05	0.10~0.30	—	—	0.10	0.15	0.05④	0.15	余量	
R4643	3.6~4.6	0.8	0.10	0.05	0.10~0.30	—	—	0.10	0.15	0.05④	0.15	余量	
ER5183	0.40	0.40	0.10	0.50~0.10	4.3~5.2	0.05~0.25	—	0.25	0.15	0.05④	0.15	余量	SAlMg-3
R5183	0.40	0.40	0.10	0.50~0.10	4.3~5.2	0.05~0.25	—	0.25	0.15	0.05④	0.15	余量	

续表 4.7-11

焊丝型号	化学成分（质量分数）/%[①②]												国内外焊丝型号对照
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	其他元素 单个	其他元素 总量	Al	
R5356	0.25	0.40	0.10	0.50~0.20	4.5~5.5	0.05~0.20	—	0.10	0.06~0.20	0.05[④]	0.15	余量	
ER5554	0.25	0.40	0.10	0.50~0.10	2.4~3.0	0.05~0.20	—	0.25	0.05~0.20	0.05[④]	0.15	余量	SAlMg-1[⑪]
R5554	0.25	0.40	0.10	0.50~0.10	2.4~3.0	0.05~0.20	—	0.25	0.05~0.20	0.05[④]	0.15	余量	
ER5556	0.25	0.40	0.10	0.50~0.10	4.7~5.5	0.05~0.20	—	0.25	0.05~0.20	0.05[④]	0.15	余量	SAlMg-5[⑪]
R5556	0.25	0.40	0.10	0.50~0.10	4.7~5.5	0.05~0.20	—	0.25	0.05~0.20	0.05[④]	0.15	余量	
ER5654	⑧	⑧	0.05	0.01	3.1~3.9	0.15~0.35	—	0.20	0.05~0.15	0.05[④]	0.15	余量	SAlMg-2
R5654	⑧	⑧	0.05	0.01	3.1~3.9	0.15~0.35	—	0.20	0.05~0.15	0.05[④]	0.15	余量	
R-206.0i[⑨]	0.10	0.15	4.2~5.0	0.20~0.50	0.15~0.35	—	0.05	0.10	0.15~0.30	0.05	0.15	余量	
R-C355.0	4.5~5.5	0.20	1.0~1.5	0.10	0.40~0.6	—	—	0.10	0.20	0.05	0.15	余量	
R-A356.0[⑩]	6.5~7.5	0.20	0.20	0.10	0.25~0.45	—	—	0.10	0.20	0.05	0.15	余量	
R-357.0	6.5~7.5	0.15	0.05	0.03	0.45~0.6	—	—	0.05	0.20	0.05	0.15	余量	
R-A357.0[⑩]	6.5~7.5	0.20	0.20	0.10	0.40~0.7	—	—	0.10	0.04~0.20	0.05	0.15	余量	

① 本表中指名并限定其含量的焊丝各元素应予分析。如分析时发现有其他元素存在，则其含量应予测定且不应超过“其他元素”栏目中的限值。
② 单个值表示最大值，除该处另有说明。
③ w（Si+Fe）不得超过0.95%。
④ w（Be）不得超过0.000 8%。
⑤ 非合金铝的 w（Al）为100%减去单个 w（Al）在0.01%或0.01%以上的所有其他金属元素含量之和，在确定此值前，所有其他金属元素含量要表示到小数点后面两位。
⑥ w（V）最大值为0.05%，w（Ga）最大值为0.03%。
⑦ w（V）范围为0.05%~0.15%，w（Zr）含量范围为0.10%~0.25%。
⑧ w（Si+Fe）不得超过0.45%。
⑨ w（Sn）不超过0.05%。
⑩ w（Be）范围为0.04%~0.07%。
⑪ 国内外牌号近似相当。



铝及铝合金焊丝的尺寸和偏差、化学成分和表面质量必须符合我国国家标准或企业标准或订货协议规定的要求。焊丝表面光滑，无毛刺、划伤、裂纹、凹坑、摺叠、皱纹、油污和对焊接工艺性、焊丝输送机构工作、焊缝金属质量有不利影响的杂质。

铝及铝合金焊丝表面有油封和氧化膜，易引起焊缝气孔。使用前需进行表面化学清洗，化学清洗后的存放待用时间内，焊丝表面生成新的氧化膜，表面疏松、有较多孔洞，易吸收水分。存放待用时间越长，表面氧化膜厚度和水化程度越大，即使按要求在 8 ~ 24 h 内焊接，也难保证焊接时不产生焊缝气孔。

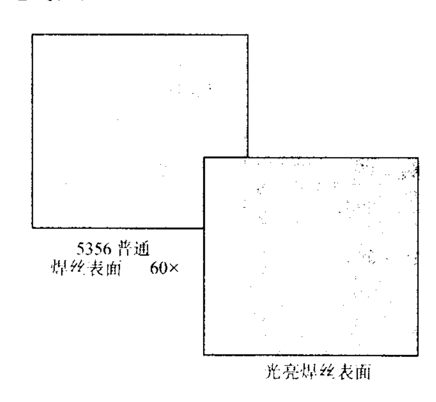


图 4.7-10　光亮焊丝和普通焊丝表面

光亮铝及铝合金焊丝解决了上述问题。焊丝经拉伸、定径、化学清洗后、用化学方法、电化学方法或机械方法抛光焊丝表面，制成表面光洁、光滑、光亮的焊丝，表面组织致密，不易吸潮，抛光后存放几小时，1 年、2 年，表面含氢量低，质量稳定。图 4.7-10 示出了光亮焊丝和普通焊丝表面的差别。光亮铝及铝合金焊丝焊前不需要进行机械或化学清洗，直接用于焊接生产，开封存放待用时间允许延长，在真空或惰性气体保护下，封装在干燥洁净环境条件下的储存有效期以年计。光亮焊丝的工艺特性、焊缝气孔敏感性、氧化膜夹杂物敏感性优于化学清洗的同型号焊丝。

焊丝化学成分包含合金元素、微量元素和杂质元素。合金元素在焊丝化学成分中占主体地位，决定焊丝的使用性能，如力学性能、焊接性能、耐蚀性能。微量元素，如 Ti、Zr、V、B、Sc 等有利于辅助改善上述性能，细化焊缝金属晶粒、降低焊接裂纹敏感性，提高焊缝金属塑性和韧性。微量元素含量应严格限制，以 Ti、Zr 为例，最大含量不超过 0.25%（质量分数），否则将造成成分偏析，在一根焊丝不同部位，Ti 和 Zr 含量出现大起大落超差现象。杂质元素对焊丝性能有害，需严格控制。

选用焊丝时，对焊丝性能的要求是：焊接裂纹、焊缝气孔敏感性低，焊接接头力学性能好，使用环境条件下的耐蚀性好，焊缝金属表面颜色与母材表面颜色匹配。

焊丝有时不能同时满足各项要求，焊丝某些性能有时互相矛盾，例如，强度与塑性、裂纹敏感性和颜色匹配不能兼顾。SAlSi－1 焊丝液态流动性好，裂纹敏感性极低，但塑性差，用于焊接 Al－Mg 合金、Al－Zn－Mg 合金时，焊缝脆性较大。由于含 Si 量高，焊缝表面颜色发乌，焊后阳极化表面更黑，和母材颜色难以匹配。

针对不同材料和主要（或特殊的）性能要求选择焊丝，见表 4.7-12。

一般情况下，焊丝选用可参考表 4.7-13。

焊接纯铝选用同型号纯铝焊丝。

焊接铝－锰合金选用同型号铝－锰合金焊丝或纯铝 SAl－1 焊丝。

表 4.7-12　不同材料和性能要求选择焊丝

材料	按不同性能要求推荐的焊丝				
	要求高强度	要求高延性	要求焊后阳极化后颜色匹配	要求抗海水腐蚀	要求焊接时裂纹倾向低
1100	SAlSi－1	SAlSi－1	SAlSi－1	SAlSi－1	SAlSi－1
2A16	SAlCu	SAlCu	SAlCu	SAlCu	SAlCu
3A21	SalMn	SalMn	SalMn	SAl－1	SAlSi－1
5A02	SAlMg－5	SAlMg－5	SAlMg－5	SAlMg－5	SAlMg－5
5A05	LF14	LF14	SAlMg－5	SAlMg－5	LF14
5083	ER5183	ER5156	ER5156	ER5156	ER5183
5086	ER5356	ER5356	ER5356	ER5356	ER5356
6A02	SAlMg－5	SAlMg－5	SAlMg－5	SAlSi－5	SAlSi－1
6063	ER5356	ER5356	ER5356	SAlSi－1	SAlSi－1
7005	ER5356	ER5356	ER5356	ER5356	X5180
7039	ER5356	ER5356	ER5356	ER5356	X5180

焊接铝-镁合金，如果 Mg 含量在 3% 以上，选用同系同型号焊丝；如果 Mg 含量在 3% 以下，选用高 Mg 含量的 SAlMg5 或 ER5356 焊丝。

焊接铝-镁-硅合金，裂纹敏感性大，一般选用 SAlSi－1 焊丝；如果焊缝与母材颜色不匹配，结构拘束度不大时，选用 SAlMg-5 铝-镁合金焊丝。

焊接铝-铜-镁、铝-铜-镁-硅合金，裂纹敏感性大，一般选用 SAlSi－1、ER4145 或 BJ－380A 焊丝。ER4145（Al－10Si－4Cu）焊丝抗热裂能力强，焊缝塑性差，一般只用于拘束度不大和不重要的结构。SAlSi－1（Al－5Si－Ti）焊丝抗结晶裂纹能力强，抗液化裂纹能力较差，焊缝塑性较好。

焊接铝-铜-硅合金，选用 BJ-380A 或 BJ-380 焊丝。BJ-380A 焊丝抗热裂能力强，焊接接头常温性能良好，低温超低温性能较差，一般用于常温使用的焊接结构。BJ-380 焊丝抗裂能力不如 BJ-380A 焊丝，常温、低温、超低温性能良好，适用于拘束度较小、低温超低温下使用的焊接结构。

焊接铝-铜-锰合金，焊接性较好，选用 SAlCu、ER2319 焊丝。

焊接铝-锌-镁合金，有一定的焊接裂纹敏感性，选用与母材成分相同的铝-锌-镁焊丝、高镁的铝-镁焊丝或高镁低锌的 X5180 焊丝。

焊接铝-镁-锂、铝-镁-锂-钪合金，焊接裂纹敏感性低，选用化学成分与母材成分相近的铝-镁合金、铝-镁-钪焊丝。

焊接不同型号的铝及铝合金，参考表 4.7-13，有些组合需要通过焊接性试验或焊接工艺评定，最终选定焊丝。

(3) 焊丝的研制

新型铝合金现有焊丝不能满足要求时，应研制新型焊丝。

① 铝合金焊丝研制原则：所选焊丝合金系和母材相容；焊丝化学成分含量范围易于冶炼、控制；焊丝具有良好的焊接工艺性能，包括流动性、焊缝成形等；严格控制焊丝的气含量、杂质含量。

② 铝合金焊丝研制步骤：焊丝化学成分设计；焊丝冶炼、制丝；焊接裂纹敏感性试验，可采用十字搭接、鱼骨试样；焊接工艺性试验；接头力学性能试验；焊丝化学成分定界；制定焊丝技术条件。



表 4.7-13　焊丝选用指南

母材之一 ＼ 母材之二	7005	6A02 6061 6063	5083 5086	5A05 5A06	5A03	5A02	3A21 3003	2A16 2B16	2A12 2A14	1070 1060 1050
	与母材配用的焊丝①,②,③									
1070 1060 1050	SAlMg－5④	SAlSi－1④	ER5356	SAlMg－5 LF14	SAlMg－5④	SAlMg－5④	SalMn⑤	—	—	SAl－1 SAl－2 SAl－3
2A12 2A14	—	—	—	—	—	—	—	—	SAlSi－1② BJ－380A	
2A16 2B16	—	—	—	—	—	—	—	SAlCu		
3A21 3003	SAlMg－5	SAlSi－1	SAlMg－5⑥	SAlMg－5⑥	SAlMg－5⑥	SAlMg－1⑥	SalMn⑤ SAlMg－3			
5A02	SAlMg－5⑧	SAlMg－5⑦	SAlMg－5⑥	SAlMg－5 LF14	SAlMg－5⑥	SAlMg－5⑥				
5A03	SAlMg－5⑥	SAlMg－5⑧	SAlMg－5⑥	SAlMg－5 LF14	SAlMg－5⑥					
5A05 5A06	SAlMg－5⑥ LF14	SAlMg－5⑥	SAlMg－5 LF14	SAlMg－5 LF14						
5083 5086	SAlMg－5	SAlMg－5⑥	SAlMg－5⑥							
6A02 6061 6063	SAlMg－5 SAlSi－1⑧	SAlSi－1⑧								
7005	X5180⑨									

① 不推荐 SAlMg－3、ER5183、SAlMg－5、ER5356、SAlMg2、ER5654 在淡水或盐水中，接触特殊化学物质或持续高温（超过 65℃）的环境下使用。

② 本表中的推荐意见适用于惰性气体保护焊接方法。氧燃气火焰气焊时，通常只采用 SAl－1、SAl1－2、SAl－3、ER1188、ER1100、SAlSi－2、ER4043 及 ER4047。

③ 本表内未填写焊丝的母材组合不推荐用于焊接设计或需通过试验选用焊丝。

④ 某些场合可用 SAlMg－3、ER5183。

⑤ 某些场合可用 SAl－1 或 SAl－2、SAl－3。

⑥ 某些场合可用 SAlMg－3。

⑦ 某些场合可用 SAlSi－1。

⑧ 某些场合也可采用 SAlMg－1、SAlMg－2、SAlMg－3，它们或者可在阳极化处理后改善颜色匹配，或者可提供较高的焊缝延性，或者可提供较高的焊缝强度。SAlMg－1 适于在持续的较高温度下使用。

⑨ X5180 焊丝的成分（质量分数）：Mg＝3.5%～4.5%，Mn＝0.2%～0.7%，Cu≤0.1%，Zn＝1.7%～2.8%，Ti＝0.06%～0.20%，Zr＝0.08%～0.25%。

（4）保护气体

铝及铝合金气体保护焊接只能采用氩气或氦气。惰性气体纯度（体积分数）一般应大于 99.8%，含氮量应小于 0.04%，含氧量应小于 0.03%，含水量应小于 0.07%。当含氮量超标时，易产生焊缝气孔，焊缝表面上会产生淡黄色或草绿色化合物——氮化镁。当含氧量超标时，熔池表面上产生密集黑点、电弧不稳定、焊接飞溅较大。含水量超标时，熔池沸腾、易生成焊缝气孔。航空航天工业用惰性气体纯度应大于 99.9%。

氩气和氦气物理特性相差较大，见表 4.7-14。氦气的密度、电离电位和其他物理参数均比氩气高，氦弧发热大、利于增加熔深，但消耗量大，价格昂贵。

（5）电极

钨极氩弧焊电极材料有纯钨、钍钨、铈钨，成分和特点见表 4.7-15。

表 4.7-14　惰性气体物理特性

性　质	氩　气	氦　气
相对原子质量	39.944	4.002
沸点/℃	－185.8	－268.9
电离电压/V	15.69	24.26
密度/$g \cdot L^{-1}$	1.663	0.166
质量比定压热容/$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	$0.125 \times 4\,186.8$	$1.250 \times 4\,186.8$
热导率/$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	0.017	1.39×10^{7}
空气中的含量（体积分数）/%	0.932 5	0.000 5



表 4.7-15　钨极成分和特点

钨极牌号		化学成分（质量分数）/%							特　点
		W	ThO_2	CeO	SiO	$Fe_2O_3+Al_2O_3$	MO	CaO	
纯钨极	W_1	>99.92	—	—	0.03	0.03	0.01	0.01	熔点和沸点高，要求空载电压较高，承载电流能力较小
	W_2	>99.85	—	—	（总含量不大于 0.15）				
钍钨极	WTh-10	余量	1.0~1.49	—	0.06	0.02	0.01	0.01	加入了氧化钍，可降低空载电压，改善引弧稳弧性能，增大许用电流范围，但有微量放射性，不推荐使用
	WTh-15	余量	1.5~2.0	—	0.06	0.02	0.01	0.01	
铈钨极	WCe-20	余量	—	2.0	0.06	0.02	0.01	0.01	比钍钨极更易引弧，钨极损耗更小，放射性剂量低，推荐使用

纯钨极熔点和沸点高，不易熔化和挥发，电极烧损小，对铝的污染较小，易受铝污染，电子发射能力较差。钍钨极电子发射能力强，电弧较稳定，钍元素有一定的放射性，不推荐广泛使用。铈钨极电子逸出功低，易于引弧，化学稳定性高，允许电流密度大，无放射性，推荐广泛使用。铈钨极不易污染基体金属，电极端易保持半球形，适于交流氩弧焊。

钨极许用电流范围见表 4.7-16。

表 4.7-16　钨极许用电流范围

电极直径/mm	直流/A				交流/A	
	正接（电极-）		反接（电极+）			
	纯钨	钍钨、铈钨	纯钨	钍钨、铈钨	纯钨	钍钨、铈钨
0.5	2~20	2~20	—	—	2~15	2~15
1.0	10~75	10~75	—	—	15~55	15~70
1.6	40~130	60~150	10~20	10~20	45~90	60~125
2.0	75~180	100~200	15~25	15~25	65~125	85~160
2.5	130~230	170~250	17~30	17~30	80~140	120~210
3.2	160~310	225~330	20~35	20~35	150~190	150~250
4.0	275~450	350~480	35~50	35~50	180~260	240~350
5.0	400~625	500~675	50~70	50~70	240~350	330~460
6.3	550~675	650~950	65~100	65~100	300~450	430~575
8.0	—	—	—	—	—	650~830

（6）焊剂选择

气焊、碳弧焊过程中熔化金属表面容易氧化，生成氧化膜，易导致焊缝产生夹杂物，妨碍基体金属与填充金属熔合。为保证焊接质量，需要焊剂去除氧化膜。

气焊、碳弧焊焊剂是钾、钠、锂、钙等元素的氯化物和氟化物粉末混合物。表 4.7-17 列出了气焊、碳弧焊常用焊剂配方。

气焊、碳弧焊方法焊接角接、搭接接头时，往往不能完全清除焊件上的熔渣，建议选用表 4.7-17 中的 8 号焊剂。铝镁合金焊剂，不宜含有钠，选用 9、10 号焊剂。

1.2.3　焊接工艺

（1）接头设计

设计铝及铝合金焊接结构时，应考虑下列因素。

1）焊接制造工艺性，焊缝分布合理，施焊操作可达性好，焊接后便于实施焊接质量检测，重要焊缝应便于实施 X 射线检验。

2）尽量采用对接或锁底对接形式。当材料和焊接接头断裂韧度较低，承受拉伸载荷（或动载荷）较大，结构刚性较强或零件厚度差别较大时，应采用对接形式，不应采用搭接、T 形接、角接、锁底对接形式。宜将图 4.7-11a 中非对接接头形式改为图 4.7-11b 中对接接头形式，以避免应力集中严重，承载能力下低，难以实施 X 射线检验，难以完全清除残余熔渣。当无法避免非对接接头形式时，可将焊缝布置在承载要求低、不太重要，无需 X 射线检验的部位。

3）焊接接头形式和基本尺寸可参考国内外相关标准或手册资料数据，同时征求制造厂工艺人员的意见和建议，必

表 4.7-17　气焊、碳弧焊焊剂（质量分数）　%

序号＼组成	铝块晶石	氟化钠	氟化钙	氯化纳	氯化钾	氯化钡	氯化锂	硼砂	其他	备注
1	—	7.5~9	—	27~30	49.5~52	—	13.5~15	—	—	
2	—	—	4	19	29	48	—	—	—	
3	30	—	—	30	40	—	—	—	—	
4	20	—	—	—	40	40	—	—	—	
5	—	15	—	45	30	—	10	—	—	
6	—	—	—	27	18	—	—	14	硝酸钾 41	
7	—	20	—	20	40	20	—	—	—	硝酸钾 28
8	—	—	—	25	25	—	—	40	硫酸钠 10	
9	4.8	—	14.8	—	—	33.3	19.5	氧化镁 2.8	氟化镁 24.8	
10	—	氟化锂 15	—	—	—	70	15	—	—	
11	—	—	—	9	3	—	—	40	硫酸钾 20	
12	4.5	—	—	40	15	—	—	—	—	
13	20	—	—	30	50	—	—	—	—	



要时需进行工艺评定试验，以验证资料信息数据是否适合实际结构和焊接工艺的具体条件。

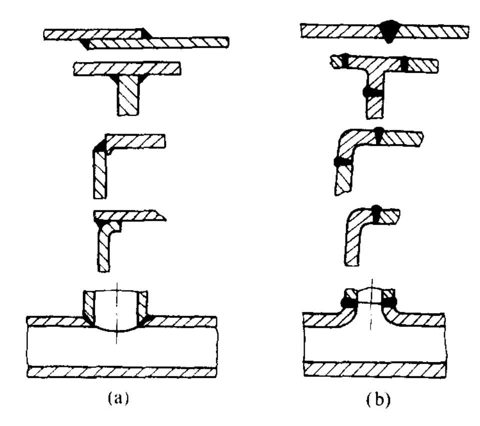


图 4.7-11 焊接接头形式

(2) 零件制备

按设计图纸规定进行下料和坡口加工，可采用剪、锯、铣、车（旋转体）等冷加工方法，也可采用热切割方法（氧－乙炔火焰切割、等离子弧切割），热切割后需去除热影响区。零件加工后的尺寸和质量必须有利于满足零件装配焊接时对坡口尺寸、错边、间隙的要求。

装配前，零件及普通焊丝必须进行表面处理，清除表面油脂、污物和氧化膜，以免产生焊缝气孔。

化学清理法效率高，质量稳定，适用于成批生产的中小型尺寸零件。化学清理法清洗液配制见表 4.7-18。

工件尺寸较大、生产周期较长、多层焊或化学清洗后又沾污时，常采用机械清理法。先用丙酮或汽油擦拭表面除油，随后用 ϕ0.15 mm 的不锈钢丝刷打磨或刮刀刮削，到露出金属光泽为止。不宜用砂轮或砂纸打磨，砂粒易留在金属表面，产生夹渣缺陷。

零件和焊丝经过清洗后，存放过程中会重新产生氧化膜。特别是在潮湿、被酸、碱等蒸气污染的环境中，氧化膜成长更快。零件、焊丝清洗后应尽量缩短焊前存放时间，应在清理后 4～8 h 内施焊，清理后存放时间过长，则需要重新清理。

表 4.7-18 铝及铝合金的化学清洗法

工序 / 焊丝	除油	碱洗			冲洗	中和光化			冲洗	干燥
		溶液	温度/℃	时间/min		溶液	时间/min	温度/℃		
纯铝	汽油、丙酮、四氯化碳、碳酸三钠	6%～12% NaOH	40～60	≤20	流动清水	30% HNO_3	1～3	室温或 40～60℃	流动清水	风干或低温干燥
铝镁、铝锰合金		6%～10% NaOH	40～60	≤7	流动清水	30% HNO_3	1～3	室温或 40～60℃	流动清水	风干或低温干燥

质量要求较高的焊缝，坡口应采用机械干铣方法加工、立即焊接。

光亮铝及铝合金焊丝焊前无需清洗。

(3) 零件装配

焊前零件装配是重要工序，直接影响焊接拘束度、焊接裂纹敏感性、焊接变形和焊接应力，对焊接质量起重要作用。

铝及铝合金零件装配直接定位焊，焊件变形不易控制。多采用焊接夹具，设计铝及铝合金焊接夹具应注意：

① 从零件正反面夹紧，夹具刚性和夹紧力大小适当，夹紧力过小难以控制焊接变形和保证焊件尺寸；夹紧力过大造成焊接拘束度较大，易引起焊接裂纹，一般以每 100 mm 长度接缝上有 350 kg 左右均匀夹紧力为宜。

② 装配大尺寸厚壁零件一般采用多个小型柔性夹具（卡子，弓形夹钳等）。

③ 装配大尺寸薄壁零件，直缝一般采用琴键式夹具，环缝采用液压胀形夹具。

④ 装配软状态铝及铝合金零件，夹具材料选用碳钢或不锈钢，以减小焊接散热速度；装配硬状态铝及铝合金零件，夹具材料选用铝或铝合金，以增大散热速度，缓解热影响区软化和减小裂纹敏感性。

⑤ 在紧贴零件焊接区背面夹具上应镶嵌垫板，以防止铝及铝合金焊缝及近缝区塌陷和利于焊缝根部成形良好，垫板材料选用铜、不锈钢、碳钢、钛合金、石墨等，视工艺对焊缝冷却速度要求而定。垫板上应开焊漏槽，做法是在垫板上部紧贴零件接缝区铣出沿焊缝纵向的圆弧形槽，槽内形成向母材圆滑过渡的焊缝反面余高，槽径和槽深视焊缝反面余高形状和尺寸而定。铝及铝合金焊缝根部易产生焊缝气孔和氧化夹杂，漏于垫板槽内，减小或免除焊缝有效工作面内的缺陷，有利于提高焊接接头强度。

⑥ 两零件配装不良，宁可调换零件，不宜强力装配，以免装配应力过大。

⑦ 结构刚性较大，应采取能减小焊接应力和变形的装配技术措施。焊接纵向焊缝，装配时适当增大预留对接间隙，使纵缝有横向收缩余地；焊接环形焊缝，例如在板金件上装配法兰盘，适当预留工艺反向错边，焊接后不致出现法兰塌陷变形。

零件清理、装配后，焊接区表面可能存有碎屑、油迹、手迹、灰尘，需清理干净，可用氩气或干燥的压缩空气通吹焊接区，再用丙酮擦拭坡口及焊接区表面，然后用不起毛的白色薄软织物或如图 4.7-12 所示的乙烯树脂带覆盖焊接区，以保护焊接区存放待焊期间免遭污染，焊接时再将覆盖物除去。

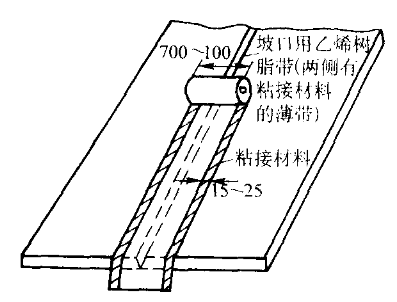


图 4.7-12 保护坡口用的乙烯树脂带

先装配，再坡口清理，清理后立即焊接效果最好。

实例 铝合金开口薄壁筒体 TIG 焊夹具设计

铝合金开口薄壁筒体见图 4.7-13。

筒体材料为 5A06 铝合金，结构复杂，尺寸精度要求严格。设计制造了焊接夹具，包括底座、内胎、纵向夹紧机构，纵缝垫板，环向撑紧机构、外卡箍、气路控制系统，传动系统等。

内胎为可分解的框架式结构，适应开口薄壁筒体结构和尺寸要求，零件组装方便，对缝简易，见图 4.7-14。

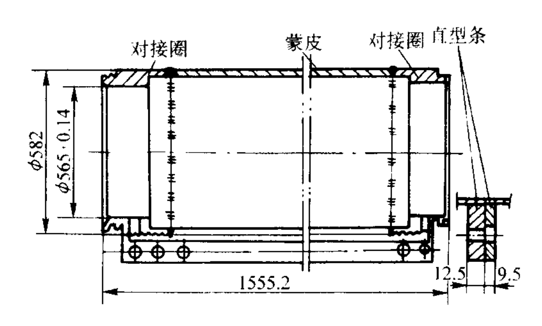


图 4.7-13　铝合金开口薄壁筒体结构示意图

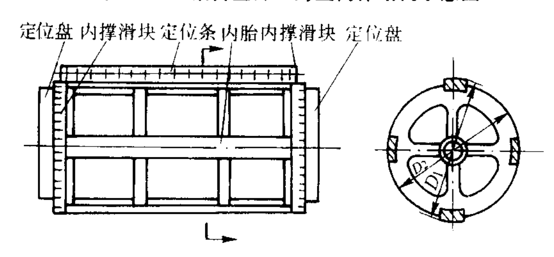


图 4.7-14　框架式内胎

纵向夹紧机构为气缸 - 摆动架 - 琴键式压板结构，压紧力均匀可调，使用可靠，能有效控制焊缝变形，防止蒙皮失稳变形。见图 4.7-15。

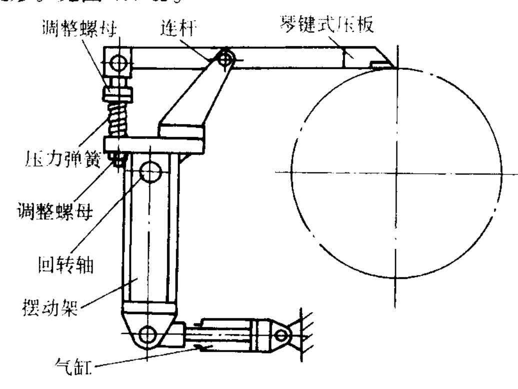


图 4.7-15　气缸 - 摆动架 - 琴键式压板结构

外卡箍采用链节式结构，防上蒙皮凸起，控制对接圈和蒙皮间的错边，见图 4.7-16。

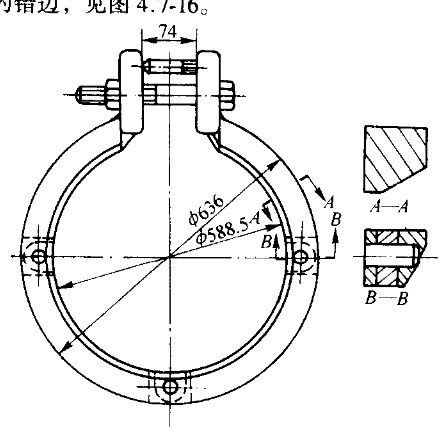


图 4.7-16　链节式外卡箍

环向撑紧结构采用凸轮 - 挺杆 - 滑块结构，内有向外撑出的 8 个大滑块，每个大滑块由 6 个不锈钢小滑块组成，小滑块上有弧形焊漏槽，以控制焊缝反面余高。通过气缸和弹簧动作，撑紧两零件对接部位，使滑块与零件紧密贴合，见图 4.7-17。

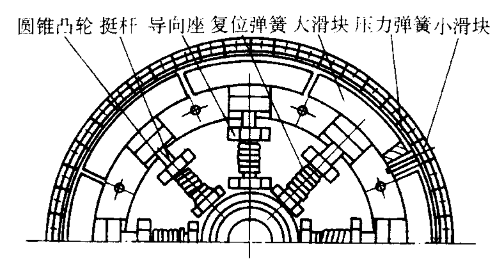


图 4.7-17　凸轮 - 挺杆 - 滑块式结构

纵向垫板用不锈钢制成，开有弧形焊漏槽，宽度为 6 ~ 8 mm，深度 0.5 ~ 0.8 mm。内胎由无级调速的蜗轮蜗杆传动机构带动可实现纵缝换位和环缝转动。

上述焊接夹具可实现筒体一次装夹，完成两条纵缝和两条环缝 TIG 焊，焊缝成形和质量良好。

(4) 焊前预热

铝及铝合金焊前预热的作用：①去除焊件表面吸附的湿气，利于减少或消除焊缝气孔；②降低焊接冷却速度，减小焊接裂纹敏感性；③降低焊接应力，减小焊接变形；④增加焊接热影响区宽度，接头软化程度增加。

预热温度视具体情况而定。软状态铝及铝合金零件的预热温度一般为 100 ~ 150℃，硬状态铝及铝合金零件，包括 Mg 含量达 4% ~ 5% 的铝 - 镁合金构件，预热温度不应超过 100℃。否则强化效果或应力腐蚀敏感性会受到不利影响。

小构件可进行整体预热，大构件可进行局部预热。整体预热可采用电加热器或在炉内进行。局部预热区域一般局限于邻近焊缝的母材区，可在电弧前方安装预热用气炬或钨极以便超前预热。

实例　航天低温贮箱箱底的焊接预热

某大型航天运载工具低温贮箱，直径 3 000 mm，承受内压，工作温度为 - 200℃左右，后箱底椭球形结构受力最大，是关键部件。箱底材料为 2A14 铝合金，焊接区厚度 3.7 ~ 4.0 mm，焊接方法采用单面自动钨极氩弧焊，通过优化焊接参数，焊缝 X 光透视合格，但力学性能不稳定，存在表面裂纹，不能满足低温使用要求。

采用焊前预热工艺，使用碘钨灯加热，优化碘钨灯加热效率和烘烤时间，圆满解决了上述问题，提高了接头力学性能，缺陷明显减少，满足使用要求。

(5) 焊接工艺参数选用

选定铝及铝合金焊接方法，需优化焊接工艺参数。

火焰气焊工艺参数包括火焰性质、填充焊丝直径、焊嘴孔径、燃气流量、焊接速度。

电弧焊工艺参数包括惰性气体种类、电弧电压、焊接电流、焊接速度、惰性气体流量。

电子束焊工艺参数包括加速电压、束流、焦点位置、扫描波形和频率。

激光焊工艺参数包括激光类型和功率、焊接速度、焊件表面状态。

变极性等离子弧焊工艺参数包括焊接电流正负半波幅值和时间、焊接电压、焊接速度、离子气流量、保护气流量。

焊接工艺参数决定焊缝成形、焊接质量和焊接接头性能。

选择焊接工艺参数，可查阅各种焊接手册和焊接工艺指导资料，作为参考。必须具体分析焊件结构、材料特性、装配质量、性能和质量要求，现场焊接工艺条件和经验，必要时需通过焊接工艺参数试验或工艺评定试验，最终确定焊接工艺参数。

1.2.4　焊接缺陷预防措施

(1) 焊接裂纹预防措施



焊接裂纹是铝及铝合金焊接结构中最重要的缺陷，焊接时应首先考虑预防措施。

1）选用合适原材料　铝及铝合金原材料要选用综合性能（强度、延性、断裂韧度、成形性、焊接性、耐蚀性、经济性等）较好的材料，不可片面追求材料高强度而最终落入材料焊接性差，焊接技术难度过大的境地。优先选择焊接性良好的变形强化或热处理强化铝合金，如 Al-Mg 系的 5A05、5A06 合金、Al-Cu-Mn 系的 2219 合金、Al-Zn-Mg 系的 7005 合金等。

必须选用焊接性较差的热处理强化铝合金时，如 Al-Si-Mg、Al-Cu-Mg、Al-Cu-Mg-Si 系的 6A02、2A12、2A14 等型号铝合金，焊件尺寸不大时，采用退火状态焊接，焊后再淬火时效的工艺方案，软状态零件可减小焊接拘束度，避免产生焊接裂纹。

2）选用小拘束度结构　结构拘束度是焊接裂纹产生的力学条件。结构拘束度过大，焊接性良好的原材料也可能产生焊缝裂纹。必须选用拘束度小的结构形式，避免产生焊接裂纹。

实例　6A02－T6 铝合金容器法兰环缝焊接裂纹预防措施

6A02－T6 容器封头上需焊接一个法兰，法兰为锻件经机械加工而成，通孔直径为 12 mm，法兰座直径为 60 mm，容器直径为 500 mm，法兰座与封头对接的厚度为 5 mm，法兰座环缝采用 V 形坡口手工钨极氩弧焊，焊丝为 SAlSi－1。

容器试制时，法兰座环缝曾多处发现沿熔合线走向的焊接裂纹，补焊后 X 射线照相检查合格，液压强度试验时环缝提前断裂，沿环缝内侧扩展至封头上。断裂起源于环缝内侧背面一条长约 3 mm，距背面表面约 0.2～0.5 mm 的裂纹。裂纹性质为焊接液化裂纹。

为防治环缝焊接裂纹，提高承载能力，将封头向外翻边，法兰基座改为管式，内径 ϕ10 mm，外径 ϕ20 mm，形成管－管对接。结构拘束度减小，消除了焊接裂纹，液压试验一举成功。

3）选用适当焊丝　铝及铝合金材料选定后，化学成分无法改变，选用适当焊丝和熔合比，可获得抗裂能力较强的焊缝金属和近缝区组织。为防止产生焊接裂纹，焊丝应具备下列特性：

① 能向熔池提供足够数量流动性良好的低熔点共晶体，填充焊缝金属固－液态晶间开裂防止形成结晶裂纹；能穿过熔合线、渗入近缝区，填充晶间开裂防止形成液化裂纹（称“自愈”）。

② 使焊缝金属固相线温度低于或接近于近缝区液化低熔点共晶体的最低熔化温度，使近缝区液化低熔点共晶体先凝固完毕，焊缝金属后凝固。

焊接性好的铝合金若焊丝选择不当，也会产生焊接裂纹。

4）选用合理焊接顺序　采用合理焊接顺序可减小拘束度和焊接应力，预防焊接裂纹，要点是为每条焊缝创造适度收缩条件。

实例　6B16－T87 铝合金容器封头的拼焊

6B16－T87 容器的封头是一种多个瓜瓣状零件（简称瓜瓣）拼焊结构，其壁厚为 6 mm，共有 6 块瓜瓣，瓜瓣之间有纵缝，瓜瓣与其他零件之间有环缝。为防止焊接裂纹，采取如下装配－焊接顺序：

先装配－焊接瓜瓣纵缝，再焊接瓜瓣和其他零件之间的环缝。

装配-焊接瓜瓣纵缝，先定位焊第一块和第二块瓜瓣纵缝，暂不定位焊其余纵缝。焊完第一条纵缝，再定位焊第二条纵缝，焊完第二条纵缝，依此类推。

每一条纵缝均有横向收缩余地，拘束度小，瓜瓣纵缝不会产生焊接裂纹。

5）采用对接双面焊　裂纹敏感性大的铝合金，焊缝根部易出现焊接裂纹。采用双面焊可有效防止焊接裂纹。正面焊接后，背面清根，X 射线检验合格后，从背面封底焊。清根时不可深挖，以将焊缝根部缺陷除尽为原则。封底焊时，不可深熔，焊缝宜浅而薄。背面深挖深熔焊会产生正面焊缝裂纹。

6）采用合理补焊工艺　焊接性较差的铝合金，焊接缺陷超差不严重时，能不补焊的，尽量不要补焊。补焊可能会带来更严重的不良后果。不得不补焊时，需精心补焊，力求一次补焊成功，避免重复补焊。

补焊前，准确检测出缺陷位置，逐步“进尺”将缺陷除尽，避免过分深挖。为验证原有缺陷确已除尽，可进行 X 射线检测。制订补焊技术方案。补焊时先不填丝，保证补焊区金属熔化，填丝后，电弧应稍偏向焊丝，防止补焊区金属过热，电弧在补焊长度方向适度往复移动，以延长熔池存在时间，利于氢气泡从熔池逸出，熄弧时必需采用堆高熄弧法，避免产生弧坑和弧坑龟裂。补焊后，允许用机械方法（锉、刮）修磨补焊焊缝，使最终尺寸与邻近未补焊的原有焊缝尺寸一致。

7）选用自动焊　选用有利于提高焊接质量和预防焊接裂纹的焊接方法尽量用机械化焊、自动焊取代手工焊，减少频繁起弧、熄弧、接头等裂纹敏感部位，全面控制焊接工艺参数，实现全过程焊接工艺参数自动记录。采用能量集中的焊接方法，如钨极直流正极性氦弧焊、钨极脉冲交流氩弧焊等。氦弧焊焊缝晶粒细小，近缝区母材晶界上很少有晶界粗化及网状液化现象。

（2）焊缝气孔预防措施

焊缝气孔是铝及铝合金焊接中的常见缺陷，焊接标准对焊缝气孔有明确规定，防止焊缝气孔从以下几方面进行。

1）生产准备　铝及铝合金原材料、零件、焊丝、惰性气体、工业大气、送丝机构、焊接操作人员手套和手印迹，都可以提供氢源。主要氢源是水分、含水氧化膜、油污。

铝及铝合金材料和焊丝自身的含氢量宜控制在每 100 g 金属内不超过 0.4 mL，对于 2219 合金含氢量宜控制在每 100 g 金属内不超过 0.2 mL。

零件表面应经机械清理或化学清洗，以去除油污和含水氧化膜。零件清理或清洗后，用干燥、洁净、不起毛的织物或聚乙烯薄膜胶带将坡口和邻近区域覆盖好，防止沾污。必要时临焊前再用洁净刮刀刮削坡口和焊丝表面，继而用焊枪向坡口吹氩气，吹除坡口内刮屑，然后施焊。零件表面清洗后，存放待焊时间不能超过 4～24 h，否则需重新清洗。

普通焊丝表面制备过程与零件相同。抛光焊丝可直接用于焊接，焊丝拆封后存放待用，不要长期拆封存放，拆封未用完的焊丝可封存于干燥环境内。

惰性气体：露点不高于－55℃。

惰性气体管路：采用不锈钢管或铜管，从管路末端至焊枪之间采用硬质聚四氟乙烯管，不宜采用吸水性强的橡胶和乙烯树脂管路。确保惰性气体管路（包括管接头）不渗露，防止无内压时夹带湿气的工业大气渗入管路。焊枪内有冷却水管，确保管接头不漏水。现场环境湿度大时，用加热的氩气通吹气体管路，去除管壁上可能附着的水分。也可采用试板进行电弧焊接试验，根据焊道外观和阴极雾化区宽窄来定性检查惰性气体的纯度、露点和保护效果，同时也清除焊枪和气体管路中的冷凝水。

送丝机构：送丝机构不能有油或油污，送丝套管采用聚四氟乙烯管，注意清除套管壁上可能附着的冷凝水。

现场环境：铝及铝合金焊接生产厂房内环境温度宜控制在 23℃±2℃，相对湿度不宜超过 65%。如果难于控制整体环境，可考虑在大厂房内为焊件创造能空调或去湿的局部小环境。焊接工作地应远离切割、钣金、加工等工作地，焊接工作地禁放杂物，保持现场整齐清洁。

从事装配和焊接人员身上的油污、手迹、汗迹含有碳氧化合物，也是氢源。接触、加工、焊接铝合金构件时，必须穿戴白色衣、帽和手套，选择白色穿戴的目的在于发现和清除脏污。

2）结构设计　焊接接头设计应考虑避免横焊、仰焊和可达性不好的接头，避免焊接时易于发生突然断弧。焊接接头便于实施自动焊以代替引弧、熄弧、接头频繁的手工焊。

3）焊前预热、减缓散热　焊前预热减缓散热有利于减缓熔池冷却速度，延长熔池存在时间，便于氢气泡逸出，消除或减少焊缝气孔，焊前预热是铝及铝合金定位焊、焊接、补焊时预防焊缝气孔的有效措施。预热方法最好是在夹具内设置电阻加热或焊件外远红外局部加热。退火状态的Al、Al-Mn、和Mg含量小于5%的Al-Mg合金，预热温度选用100～150℃。固溶时效强化的Al-Mg-Si、Al-Cu-Mg、Al-Cu-Mn、Al-Zn-Mg合金，预热温度一般不超过100℃。减缓散热的方法是选用热导率小的材料制造工装夹具（如钢）和焊缝垫板（不锈钢或钛及钛合金）。

4）优选焊接方法　钨极交流氩弧焊和钨极直流正极性短弧氦弧焊，电弧过程稳定，环境大气混入弧柱及熔池较少，焊缝气孔敏感性较低。变极性钨极氩弧焊和变极性等离子弧焊，阴极雾化充分，焊接过程中可排除气孔和夹杂物，焊缝气孔敏感性低，可获得无缺陷焊缝。

熔化极氩弧焊存在熔滴过渡过程、过程稳定性较差，环境大气难免混入弧柱区，熔池溶氢较多、焊接速度和冷却速度较大，焊缝气孔敏感性较大，宜选用亚射流过渡和粗丝焊接。

5）优选焊接工艺参数　降低电弧电压、增大焊接电流、降低焊接速度，有利于减小焊接熔池含氢量，延长液态熔池存在时间，减缓冷却速度，便于氢气泡逸出，减少焊缝气孔。

6）焊接操作技艺　始焊和定位焊接，零件温度低、散热快，冷却速度大，易产生焊缝气孔，宜采用引弧板。定位焊起弧后稍滞留，然后填丝，可避免产生未焊透和焊缝气孔。

单面焊背面焊根处易产生根部气孔。最好实行反面坡口双面焊，正面焊后，反面清根，去除根部气孔和氧化膜夹杂物，然后施行背面封底焊。

多层焊时，宜采用薄层焊道，每层熔化金属体积较小，便于氢气泡逸出。

补焊时，焊件温度低，补焊焊缝短，起弧熄弧间距小，补焊操作不便，冷却速度大，极易产生气孔，必要时可施行远红外辐射局部预热。

手弧焊对焊缝气孔的预防很大程度上取决于焊工的操作技艺。应善于观察焊接熔池状态转化过程，气泡产生和逸出情况、切忌盲目追求高焊接速度，应善于通过操作手法，作前后适当搅动，以利气泡逸出。

自动焊时，可采用适当的机械或物理方法搅拌熔池，如超声搅拌、电磁搅拌、脉冲换气（氩、氦）、脉冲送丝等。

预防铝及铝合金焊缝气孔是一个复杂的难题，实际生产中常需结合生产条件，采取综合防治技术措施。

1.2.5　气焊

火焰气焊能量不集中，焊接速度低，焊接变形大，接头晶粒粗大、母材热影响区宽，一般用于焊接性好、厚度不大，质量要求不高的铝及铝合金构件。接头形式宜为对接，忌用搭接、T形接、角接，原因是流入零件间隙内的残余焊剂和反应产物难于清除，腐蚀焊件。

铝及铝合金气焊以乙炔气、天然气为燃气。溶剂选择见表4.7-17，焊丝选择见表4.7-13。

铝及铝合金气焊接头坡口形式见表4.7-19。

铝及铝合金气焊焊嘴规格和火焰调节对焊接接头质量、性能、变形量、生产率有很大影响。应选择中性焰或燃气稍过量的碳化焰。燃气量过大，火焰中存在游离氢，易引起焊缝气孔、疏松等缺陷。表4.7-20列出了气焊不同厚度铝及铝合金时建议选用的焊炬、焊嘴、孔径等规格。焊嘴太小，易形成未焊透、夹渣等缺陷。随着焊嘴尺寸增大，热影响区

表4.7-19　铝及铝合金气焊的坡口形式

零件厚度/mm	接头形式	坡口简图	坡口尺寸/mm			备　注
			间隙 a	钝边 p	角度 α/(°)	
1～2	卷边		<0.5	4～5	—	不加填充焊丝
2～3	卷边		<0.5	5～6	—	
1～5	无坡口留间隙		0.5～3	—	—	
12～20	V形坡口		4～6	3～5	80±5	
12～20	X形坡口					多层焊

表 4.7-20　气焊焊炬、焊嘴和燃气消耗量

项　目	数		据			
铝板厚度/mm	1.2	1.5～2.0	3.0～4.0	5.0～7.0	7.0～10.0	10.0～20.0
焊丝直径/mm	1.5～2.0	2.0～2.5	2.0～2.5	4.0～5.0	5.0～6.0	5.0～6.0
射吸式焊炬型号	H01－06	H01－6	H01－6	H01－12	H01－12	H01－20
焊嘴号码	1	1～2	3～4	1～3	2～4	4～5
焊嘴孔径/mm	0.9	0.9～1.0	1.1～1.3	1.4～1.8	1.6～2.0	3.0～3.2
乙炔气消耗量/$L\cdot h^{-1}$	75～150	150～300	300～500	500～1 400	1 400～2 000	～2 500

加宽，组织粗大，焊接变形增大。焊接小厚度铝及铝合金时，为防止烧穿，可选用比焊接同等厚度钢板的焊嘴小1号的焊嘴。焊接较厚铝及铝合金时，可采用比焊接同等厚度钢板的焊嘴大1号的焊嘴。

气焊铝及铝合金常采用左向焊法，有利于防止金属过热和晶粒长大。

气焊厚度大于5 mm以上的铝及铝合金，需预热，预热温度在100～300℃之间，用右向焊法，有利于加热至较高温度，熔化迅速，便于观察熔池，便于操作。预热方法采用氧乙炔焰焊炬或喷嘴，预热温度用表面测温计、测温笔或凭工人经验进行检查。

焊炬、焊丝和焊件之间需保持一定的角度。焊接3 mm以下薄壁板材和管材时，焊炬应向焊接方向后方倾料15°～30°，焊丝向焊接方向前方倾斜40°～50°。随焊件温度升高，焊炬倾角应相应减小。为预防熔池温度过高产生烧穿，焊炬可作周期性上下摆动（幅度3～4 mm)。焊矩焰心距熔池表面约3～6 mm。

添加焊丝要同焊炬动作密切配合，焊丝应一滴一滴落入熔池，随时将焊丝从熔池前拉出一段距离，挑去熔池表面氧化膜，促使熔滴更好与熔池金属熔合。添加焊丝过程中，尽量避免焊丝端部与焰心接触。焊接厚度大或装配间隙小时，应尽可能压低火焰，以利焊透。

厚度大于3 mm时，应先使焊炬向焊接方向后方倾斜90°左右，随焊件温度不断升高，倾角逐渐降至45°～70°。结束焊接时，倾角减至最小，同时稍抬高焊炬，使火焰沿熔池表面移动，以避免烧穿，同时填满弧坑。

厚度在8 mm左右时，焊炬可作纵向或横向摆动。焊道层次不宜过多，多次加热容易产生过热和焊缝气孔等缺陷。

焊接环缝时，焊炬倾角应比同样条件下平焊时大10°～20°，而焊丝倾角小10°～20°。

铝及铝合金气焊后，残留在焊缝表面和两侧的焊剂及熔渣会破坏表面氧化膜保护层，引起接头腐蚀。焊后1～6 h内清洗去除。清除方法有三种：①60°～80°热水中用硬毛刷从焊缝正反面仔细刷洗；②重要焊件，经上述刷洗后，再放入60～80℃、质量分数为2%～3%的稀铬酸水溶液中浸洗5～10 mm，然后用热水冲洗、干燥；③先用60～80℃热水刷洗，再用含5%硝酸和2%的重铬酸（质量分数）的混合液清洗5～10 min，最后用热水冲洗、干燥。

1.2.6　钨极惰性气体保护焊

钨极惰性气体保护焊（TIG）过程稳定，控制简易，质量良好，适用于焊接中厚度以下铝及铝合金零件。当零件厚度较大时，需开坡口多层焊。

TIG根据保护气体不同，可分为钨极氩弧焊、钨极直流氦弧焊、钨极氦氩混合气保护焊；根据自动化程度不同可分为手工氩弧焊和自动氩弧焊；根据电源不同可分为钨极交流氩弧焊、钨极变极性氩弧焊和钨极脉冲交流氩弧焊。

铝及铝合金TIG接头、坡口形式和尺寸见表4.7-21。

表 4.7-21　铝及铝合金钨极氩弧焊接头和坡口形式及尺寸

接头及坡口形式		示意图	板厚 δ/mm	间隙 b/mm	钝边 P/mm	坡口角度 α/(°)
对接接头	卷边		≤2	<0.5	<2	—
	I形坡口		1～5	0.5～2	—	—
	V形坡口		3～5	1.5～2.5	1.5～2	60～70
			5～12	2～3	2～3	60～70
	X形坡口		>10	1.5～3	2～4	60～70



续表 4.7-21

接头及坡口形式		示意图	板厚 δ/mm	间隙 b/mm	钝边 P/mm	坡口角度 α/(°)
搭接接头			<1.5	0~0.5	$L\geqslant2\delta$	—
			1.5~3	0.5~1	$L\geqslant2\delta$	—
角接接头	I 形坡口		<12	<1	—	—
	V 形坡口		3~5	0.8~1.5	1~1.5	50~60
			>5	1~2	1~2	50~60
T 形接头	I 形坡口		3~5	<1	—	—
			6~10	<1.5	—	—
	K 形坡口		10~16	<1.5	1~2	60

铝及铝合金 TIG 常采用交流电源。焊件在负半波时有阴极雾化作用，焊件在正半波时，钨极发热较负半波时小，利于钨极冷却，不致过热熔化。

TIG 设备包括焊接电源、焊枪、氩气瓶，还包括自动焊机或自动焊机头和配套的垂直升降或水平运动装置、焊件转动装置、自动控制系统等。

铝及铝合金 TIG 焊，不采用短路引弧法，否则钨极易烧损，端部形状易破坏。不采用高频振荡引弧法，否则易击穿电子元器件、易干扰电控系统正常工作。广泛采用高压脉冲引弧和稳弧法，引弧时钨极与工件不接触，随后，引弧脉冲消失，稳弧脉冲产生，开始正弦波交流高压脉冲稳弧过程。

铝及铝合金钨极氦弧焊采用直流电源，正接。钨极为负极，焊件为正极，无阴极雾化作用，两极热量比例合理，钨极发热约为 30%，焊件受热约为 70%，可实现短弧深熔，焊缝形状窄而深。氦电离电位高，引弧比氩困难。氦弧焊直流电源具有较高的空载电压，其他技术特性与一般电源类似。

(1) 手工钨极氩弧焊

手工钨极氩弧焊操作灵活，使用方便，适合于小型焊件的短焊缝、角焊缝、大尺寸构件的不规则焊缝、各种焊缝的补焊。

钨极可采用纯钨、铈钨、锆钨电极，电极端部呈半球形。制备电极时，用比焊接电流要求规格大一号的钨极，将端部磨成锥形，用比要求电流值大 20 A 的电流在试片上起弧并维持几秒种，钨极端头烧成半球形。如果钨极被铝污染，必须清理或更换钨极。

定位焊缝必须焊透，具有一定长度和强度。圆形嵌入件定位焊时，应对称定位焊，并打磨定位焊缝表面。发现定位焊缝未焊透或开裂，应磨除该段定位焊缝，重新定位焊。

冷态零件施焊，电弧应在始焊点稍停，待母材边缘开始熔化，再及时填丝运行，保证始焊点焊透。对接焊时，焊枪与零件表面夹角一般为 70°~80°，角接焊时，夹角一般为 30°~45°，填丝方向与零件表面的夹角一般不超过 15°。焊丝依靠焊工手指动作均匀送入熔池，焊丝填入点应位于熔池边沿，距电弧中心线约 0.5~1.0 mm 处，焊丝填入点不得高于熔池表面或在电弧下横向摆动，以免影响母材熔化，破坏气体保护，导致金属氧化。焊丝回撤时，不能使焊丝末端露出气体保护区，以免焊丝末端发生氧化再度送进时将氧化物带入熔池。

手弧焊铝焊丝标准长度为 1m，需经常熄弧换丝。熄弧处易形成弧坑，易过热、易产生气孔或裂纹。熄弧时必须精心操作，一般有两种熄弧操作方法，决不可突然断弧。一种方法为空拉熄弧法，通过起动焊接电流调节器，衰减焊接电流，不填丝，同步运行电弧，直至电弧熄灭，适用于裂纹敏感性小的铝及铝合金。另一种方法为堆高熄弧法，不一定衰减电流，需匀速抬高电弧，同时加速填充焊丝，直至电弧熄灭，使熄弧处焊缝局部凸出。堆高熄弧法确保不生成弧坑，预防过热和裂纹，适用于裂纹敏感性大的热处理强化铝合金。若设备上配有衰减熄弧装置，堆高熄弧法使用效果更好。

铝及铝合金手工钨极交流氩弧焊工艺参数见表 4.7-22。

(2) 自动钨极氩弧焊

自动钨极氩弧焊电弧运行和送丝均自动进行，焊接工艺参数和焊缝质量均可严格控制，焊缝平直、美观。

铝及铝合金自动钨极氩弧焊焊枪一般垂直于焊缝熔池，钨极端部对准焊缝中心，焊接速度高时，焊枪可稍后倾，以便保持对熔池的保护，焊丝与焊件间保持 10°夹角。

自动焊热输入允许比手工焊大，焊接工艺参数见表 4.7-23 所示。

(3) 钨极直流氦弧焊

铝及铝合金钨极直流氦弧焊坡口小，填丝量少。钨极直径一定时，可使用比钨极交流氩弧焊大的焊接电流；焊接电



表 4.7-22　手工钨极交流氩弧焊工艺参数

板材厚度/mm	焊丝直径/mm	钨极直径/mm	预热温度/℃	焊接电流/A	氩气流量/L·min⁻¹	喷嘴孔径/mm	焊接层数（正面/反面）	备　注
1	1.6	2	—	45~60	7~9	8	正1	卷边焊
1.5	1.6~2.0	2	—	50~80	7~9	8	正1	卷边或单面对接焊
2	2~2.5	2~3	—	90~120	8~12	8~12	正1	对接焊
3	2~3	3	—	150~180	8~12	8~12	正1	V形坡口对接
4	3	4	—	180~200	10~15	8~12	正1	V形坡口对接
5	3~4	5	—	180~240	10~15	10~12	(1~2)/1	V形坡口对接
6	4	5	—	240~280	16~20	14~16	(1~2)/1	V形坡口对接
8	4~5	5	100	260~320	16~20	14~16	(1~2)/1	V形坡口对接
10	4~5	5	100~150	280~340	16~20	14~16	(3~4)/(1~2)	V形坡口对接
12	4~5	5~6	150~200	300~360	18~22	16~20	(3~4)/(1~2)	V形坡口对接
14	5~6	5~6	180~200	340~380	20~24	16~20	(3~4)/12	V形坡口对接
16	5~6	6	200~220	360~400	20~24	16~20	(4~5)/(1~2)	V形坡口对接
18	5~6	6	200~240	360~400	25~30	16~20	(4~5)/(1~2)	V形坡口对接
20	5~6	6	200~260	360~400	25~30	20~22	(4~5)/(1~2)	V形坡口对接
16~20	5~6	6	200~260	300~380	25~30	16~20	(2~3)/(2~3)	X形坡口对接
22~25	5~6	6~7	200~260	360~400	30~35	20~22	(3~4)/(3~4)	X形坡口对接

表 4.7-23　钨极交流自动氩弧焊焊接工艺参数

焊件厚度/mm	焊接层数	钨极直径/mm	焊丝直径/mm	喷嘴直径/mm	氩气流量/L·min⁻¹	焊接电流/A	送丝速度/m·h⁻¹
1	1	1.5~2	1.6	8~10	5~6	120~160	—
2	1	3	1.6~2	8~10	12~14	180~220	65~70
3	1~2	4	2	10~14	14~18	220~240	65~70
4	1~2	5	2~3	10~14	14~18	240~280	70~75
5	2	5	2~3	12~16	16~20	280~320	70~75
6~8	2~3	5~6	3	14~18	18~24	280~320	75~80
8~12	2~3	6	3~4	14~18	18~24	300~340	80~85

流一定时，可采用小直径钨极。零件厚度一定时，可采用较小焊接电流，焊接速度快、热影响区窄、热影响程度小，焊接应力和变形小，接头力学性能等于或高于钨极氩弧焊接头。

钨极直流氦弧焊没有阴极雾化作用，不能去除焊件表面氧化膜。氦弧焊前必须彻底清理坡口表面，最好先化学清洗，再刮削，立即焊接。焊缝表面一般覆有一层氧化膜甚至黑灰，用钢丝刷或抹布容易擦除。

钨极直流氦弧焊对接接头焊接工艺参数见表 4.7-24、表 4.7-25。

表 4.7-24　手工钨极直流氦弧焊工艺参数

材料厚度/mm	坡口形式	钨极直径/mm	焊丝直径/mm	氦气流量/L·min⁻¹	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min⁻¹	焊接层数
0.8	平口对接	1.0	1.2	9.5	20	21	42	1
1.0	平口对接	1.0	1.6	9.5	26	20	40	1
1.5	平口对接	1.0	1.6	9.5	44	20	50	1
2.4	平口对接	1.6	2.4	14	80	17	28	1
3	平口对接	1.6	3.2	9.5	118	15	40	1
6	平口对接	3.2	4.0	14	250	14	3	1
12	V形，90°钝边6 mm	3.2	4.0	19	310	14	14	2
18	X形，90°钝边5 mm	3.2	4.0	24	300	17	10	2
25	X形，90°	3.2	6.4	24	300	19	3.5	5

表 4.7-25　自动钨极直流正接氦弧焊工艺参数

材料厚度/mm	电极直径 φ/mm	填充焊丝直径 φ/mm	送丝速度/cm·min⁻¹	氦气流量 L·min⁻¹	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min⁻¹	备　注
0.6	1.2	1.2	150	28	100	10	150	不开坡口、钍钨极、平焊位置、单层焊道
0.8	1.2	1.2	192	28	110	10	150	
1.0	1.2	1.2	173	28	125	10	150	
1.2	1.2	1.2	162	28	150	12	150	
1.6	1.2	1.2	252	28	145	13	150	
2.0	1.2	1.2	254	28	290	10	150	
3.0	1.6	1.6	140	14	240	11	110	
6.0	1.6	1.6	102	14	350	11	38	
10	1.6	1.6	76	19	430	11	10	



(4) 钨极高频脉冲氦弧焊

和钨极直流氦弧焊相比，钨极高频脉冲氦弧焊电弧挺度大，焊接能量集中。在合适的脉冲频率下，脉动电弧使熔池产生振动，利于细化晶粒、减少焊缝气孔、提高接头断裂韧性。对于 12.7 mm 厚的 2219 - T87 铝合金，和钨极直流氦弧焊相比，熔深增大 20%，焊接线能量减少 42%。对于 5 mm 厚的 LD10CS 铝合金，合适焊接频率为 9 ~ 13 kHz，和交流氩弧焊相比，接头断裂韧性增加 23%。

(5) 钨极氦氩混合气保护焊

为增大钨极氩弧焊熔透能力，可使用氩氦混合气体保护，一般为 Ar75% + He25%（体积分数）。为改善钨极直流氦弧焊引弧特性，可使用氩氦混合气体保护，一般为 He75% + Ar25%。

(6) 钨极脉冲交流氩弧焊

在钨极交流氩弧焊机焊接回路中直接串联一个交流脉冲断续器，在两端并联一个电抗器得到一个钨极交流脉冲焊接回路。

钨极交流脉冲氩弧焊可调的焊接工艺参数有：脉冲电流幅值 I_p、基值电流 I_0、脉冲电流通电时间 t_p、脉冲电流间歇时间 t_0，脉冲频率 f 和脉冲宽度比 K。

脉冲电流幅值 I_p 对焊缝尺寸特别是熔深起主导作用。基值电流在两次相邻脉冲之间，维持电弧稳定，不致熄灭，待下次脉冲作用时无需重新引弧，同时为下一个熔池和焊点的形成提供一定预热作用。熔池在脉冲瞬间形成、冷却、凝固，焊缝金属组织得到改善，母材热影响程度减轻。

铝及铝合金钨极脉冲交流氩弧焊一般采用动特性良好的方波电源，脉冲频率范围为 1 ~ 10 Hz，焊接工艺参数见表 4.7-26。

表 4.7-26　铝合金钨极脉冲交流氩弧焊工艺参数

材料	厚度 /mm	焊丝直径/mm	$I_脉$ /A	$I_基$ /A	脉冲频率 /Hz	脉宽比 /%	电弧电压 /V	气体流量 /L·min⁻¹
5A03Y2	2.5	2.5	95	50	2	33	15	5
	1.5	2.5	80	45	1.7	33	14	5
5A06Y2	2.0	2	83	44	2.5	33	10	5
2A12C2	2.5	2	140	52	2.6	36	13	8

(7) 钨极变极性氩弧焊

钨极变极性氩弧焊焊接电流波形和变极性等离子弧焊的电流波形相同，见表 4.7-23，正半波电流幅值和时间、负半波电流幅值和时间分别独立可调，在保证阴极雾化的前题下，使负半波时间尽可能小，以保证钨极烧损最小。

1.2.7　熔化极惰性气体保护焊

熔化极惰性气体保护焊（MIG）以焊丝为电极，使用比 TIG 更大的焊接电流，电弧功率大，保护气体采用氩气或氦气或氦氩混合气体，分别称为熔化极氩弧焊、熔化极氦弧焊、熔化极氦氩混合焊，可焊接中厚板，焊接生产效率高，广泛用于铝及铝合金焊接结构生产。

MIG 是熔滴过渡过程，熔滴过渡形式和过程的稳定性是 MIG 能否适用的关键。焊接电流增加，熔滴过渡由短路过渡、滴状过渡，向喷射过渡转变。短路过渡适用于厚度为 1 ~ 2 mm 的铝及铝合金构件。喷射过渡过程稳定，可焊接各种厚度铝及铝合金。在短路过渡和喷射过渡之间，存在亚射流过渡区，弧长较短，不会发生短路，弧长变化，电流电压保持不变，即使采用恒流电源（陡降外特性），电弧也能自身调节，焊接过程稳定，焊缝成形均匀美观，采用亚射流过渡焊接铝及铝合金时，焊接效率更高，焊接质量更好。

MIG 采用直流反接，分自动焊和半自动焊。

(1) 熔化极氩弧焊

熔化极氩弧焊短路过渡焊接铝及铝合金薄壁构件，采用小电流、细焊丝（ϕ0.8 mm、ϕ1.0 mm）。为避免送丝困难，采用拉丝型焊枪。可全位置焊接对接、搭接、角接等各种接头。熔化极氩弧焊短路过渡焊接工艺参数见表 4.7-27。

熔化极氩弧焊喷射过渡焊接，焊缝形状呈窄而深的指状，焊缝两侧易熔透不良，易出现焊缝气孔、焊接裂纹等缺陷。

熔化极氩弧焊亚射流过渡焊接，弧长较短、电弧电压较低，电弧略带轻微爆破声，焊丝端头熔滴长大到等于焊丝直径时便沿电弧轴线方向一滴一滴过渡到熔池，间或有瞬时短路发生。阴极雾化区大，熔池保护效果好，焊缝成形好，焊缝缺陷少。

铝及铝合金熔化极氩弧焊喷射过渡和亚射流过渡焊接工艺参数见表 4.7-28。

表 4.7-27　铝及铝合金 MIG 短路过渡焊接工艺参数

板厚 /mm	接头形式 /mm	焊接次数	焊接位置	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /cm·min⁻¹	送丝速度 /cm·min⁻¹	氩气流量 /L·min⁻¹
2	0~0.5	1	全	0.8	70 ~ 85	14 ~ 15	40 ~ 60	—	15
		1	平	1.2	110 ~ 120	17 ~ 18	120 ~ 140	590 ~ 620	15 ~ 18
1	0~2	1	全	0.8	40	14 ~ 15	50	—	14
2		1	全	0.8	70 80 ~ 90	14 ~ 15 17 ~ 18	30 ~ 40 80 ~ 90	— 950 ~ 1 050	10 14

表 4.7-28　铝合金喷射过渡及亚射流过渡 MIG 焊的焊接条件

板厚 /mm	坡口尺寸 /mm	焊道顺序	焊接位置	焊丝直径 /mm	电流 /A	电压 /V	焊速 /cm·min⁻¹	送丝速度 /cm·min⁻¹	氩气流量 /L·min⁻¹	备　注
6	α 0~2 a α=60°	1	水平	1.6	200 ~ 250	24 ~ 27 (22 ~ 26)①	40 ~ 50	590 ~ 770 (640 ~ 790)	2.0 ~ 2.4	使用垫板
		1	横、立、							
		2（背）	仰		170 ~ 190	23 ~ 26 (21 ~ 25)	60 ~ 70	500 ~ 560 (580 ~ 620)		



续表 4.7-28

板厚 /mm	坡口尺寸 /mm	焊道顺序	焊接位置	焊丝直径 /mm	电流 /A	电压 /V	焊速 /cm·min^{-1}	送丝速度 /cm·min^{-1}	氩气流量 /L·min^{-1}	备注
8	c=0~2 α=60°	1 2 1 2 3~4	水平 横、立、 仰	1.6	240~290 190~210	25~28 (23~27) 24~28 (22~23)	45~60 60~70	730~890 (750~1 000) 560~630 (620~650)	2.0~2.4	用垫板，仰焊时增加焊道数
12	c=1~3 α_1=60°~90° α_2=60°~90°	1 2 3（背） 1 2 3 1~8（背）	水平 横、立、 仰	1.6或2.4 1.6	230~300 190~230	25~28 (23~27) 24~28 (22~24)	40~70 30~45	700~930 (750~1 000) 310~340 560~700 (620~750)	20~28 20~24	仰焊时增加焊道数
16	c=1~3 α_1=60°~90° α_2=60°~90°	4道 4道 10~12道	水平 横、立、 仰	2.4 1.6 1.6	310~350 220~250 230~250	26~30 25~28 (23~25) 25~28 (23~25)	30~40 15~30 40~50	430~480 660~770 (770~790) 700~770 (720~790)	24~30	焊道数可适当增加或减少，正反两面交替焊接，以减少变形
25	c=2~3(7道时) α_1=90° α_2=90°	6~7 6道 约15道	水平 横、立、 仰	2.4 1.6 1.6	310~350 220~250 240~270	26~30 25~28 (23~25) 25~28 (23~26)	40~60 15~30 40~50	430~480 660~770 (700~790) 730~830 (760~860)	24~30	

① 括号内所给值均为亚射流过渡时的电压。

熔化极氩弧焊半自动焊是一种自动送丝、人工运行的焊接方法，适用于小焊件、短焊缝、继续焊缝或大型焊件的不规则焊缝，熔化极氩弧焊半自动焊工艺参数见表 4.7-29。

熔化极氩弧焊接头性能见表 4.7-30、表 4.7-31。

表 4.7-29　铝及铝合金熔化极氩弧焊半自动焊接工艺参数

板厚/mm	坡口形式及尺寸 /mm	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	氩气流量 /L·min^{-1}	喷嘴孔径 /mm	备注
6	0~2	2.0	230~270	26~27	20~25	20	反面采用垫板仅焊一层焊缝
8	70°, 6, 0~0.2	2.0	240~280	27~28	25~30	20	正面焊二层，反面焊一层
10	70°, 8, 0~0.2	2.0	280~300	27~29	30~36	20	正面焊二层，反面焊一层
12	70°, 9, 0~0.2	2.0	280~320	27~29	30~35	20	正反面均焊一层
14	90°~100°, 4, 0~0.3	2.5	300~330	29~30	35~40	22~24	正反面均焊一层

续表 4.7-29

板厚/mm	坡口形式及尺寸/mm	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	氩气流量/L·min⁻¹	喷嘴孔径/mm	备　注
16	90°~100°, 4, 0~0.3	2.5	300~340	29~30	40~50	22~24	正面焊二层，反面焊一层
18	90°~100°, 4, 0~0.3	2.5	360~400	29~30	40~50	22~24	正面焊二层，反面焊一层
20~22	90°~100°, 4, 0~0.3	2.5~3.0	400~420	29~30	50~60	22~24	正面焊二层，反面焊一层
25	90°~100°, 4, 0~0.3	2.5~3.0	420~450	30~31	50~60	22~24	正面焊三层，反面焊一层

表 4.7-30　铝及铝合金半自动熔化极氩弧焊接头性能　MPa

合金	母材			焊后态			焊后淬火+时效		
	拉伸强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	拉伸强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	拉伸强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%
2014-T6	483	414	13	297	193	5	414	311	5
2219-T81	455	352	10	242	179	3	379	262	7
2219-T87	497	442	10	255	228	4	386	—	6.5

表 4.7-31　铝及铝合金不同温度下熔化极氩弧焊接头拉伸性能　MPa

母材	焊丝	状态	-100°F	100°F	300°F	500°F
2219-T87	2 319	焊后	248	242	214	131
2 219	2 319	淬火+时效	380	345	262	151

(2) 熔化极氦弧焊

与熔化极氩弧焊过程类似。氦密度较小，从电弧中以扩散方式带走大量热能，对电弧产生强烈冷却作用，使电弧电场强度显著提高，熔化极氦弧焊电弧烁亮区集中，焊缝熔深较大，焊缝形状窄而深，可焊接更大厚度铝及铝合金。

(3) 熔化极氦氩混合焊

为改善熔化极氩弧焊焊缝成形、减小焊接飞溅，采用熔化极氦氩混合焊，氩氦比例为 Ar50% + He50%，Ar40% + He60%（体积分数）等。焊接大厚度铝及铝合金最好采用大电流熔化极氦氩混合焊，焊接工艺参数见表 4.7-32。

表 4.7-32　铝及铝合金熔化极氦氩混合焊接工艺参数

板厚/mm	接头形式	坡口尺寸 θ/(°)	a/mm	b/mm	层数	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/L·min⁻¹	气体流量/L·min⁻¹	保护气体[①]
25	X形坡口（θ, 1, 2, b）	90	—	5	2	3.2	480~530	29~30	30	100	Ar
25		90	—	5	2	4.0	560~610	35~36	30	100	Ar+He
38		90	—	10	2	4.0	630~660	30~31	25	100	Ar
45		60	—	13	2	4.8	780~800	37~38	25	150	Ar+He
50		90	—	15	2	4.0	700~830	32~33	15	150	Ar
60		60	—	19	2	4.8	820~850	38~40	20	180	Ar+He
50	双U形坡口（θ, a, 1, 2）	60	30	9	2	4.8	760~780	37~38	20	150	Ar+He
60		80	40	12	2	5.6	940~960	41~42	18	180	Ar+He

① Ar+He：内喷嘴 Ar50% + He50%；外喷嘴 Ar100%。

(4) 熔化极脉冲氩弧焊

为获得喷射过渡，焊接电流必须达到或超过临界电流值。铝及铝合金熔化极氩弧焊时的临界电流（参考值）为：焊丝直径 ϕ0.8 mm时，95 A；ϕ1.2 mm时，135 A；ϕ1.6 mm时，180 A。焊接电流小于临界电流时，熔化极氩弧焊发生困难，使焊接薄壁零件、全位置焊缝、特别是热敏感材料受



到很大限制。熔化极脉冲氩弧焊允许焊接电流平均值低于临界电流，脉冲电弧可稳定燃烧，解决了上述难题。

熔化极脉冲氩弧焊时，基值电流维持电弧不致熄灭，并使焊丝端头部分熔化，为下一次熔滴的形成和过渡做准备；随后脉冲峰值电流发生并叠加在基值电流上，超过临界电流，以高于短路过渡电弧所需的有效电流和低于连续电流喷射过渡电弧所需的有效电流，产生轴向喷射过渡的稳定电弧，实现一个脉冲过渡一个熔滴，焊接过程稳定。

熔化极脉冲氩弧焊时，脉冲频率一般为50 Hz和100 Hz，可用更高的频率，如200 Hz，选择焊接工艺参数时，必须保证脉冲与熔滴过渡同步，通常为一个脉冲过渡一个熔滴。

熔化极脉冲氩弧焊的下限电流可低于熔化极氩弧焊临界电流2倍左右，有利于焊接薄壁零件。

熔化极脉冲氩弧焊允许用粗焊丝取代熔化极氩弧焊时的细焊丝。例如厚度2 mm的铝板，熔化极氩弧焊需用$\phi0.8$的焊丝，熔化极脉冲氩弧焊时，可采用$\phi1.6$的焊丝，解决了细丝输送困难，同时可减少由于细丝比表面积大，易将表面污染带入焊缝而产生的焊缝缺陷。

熔化极脉冲氩弧焊有利于焊接热敏感铝合金材料，如热处理强化高强度铝合金，焊接热输入小，对母材热影响小，可获得综合性能优越的焊接接头。

铝合金薄板熔化极脉冲氩弧焊时易出现焊缝气孔。焊接厚度为3.0 mmLY12铝合金时，易出现三类气孔：①起弧处熔合区小气孔群；②焊缝中部的独立大气孔；③链状气孔。影响焊缝气孔的因素除焊前清理外还有：

① 焊嘴高度　焊嘴高度增加，焊缝气孔增加。焊嘴高度增加使焊丝干伸长度增加，焊丝端部温度升高，熔滴吸氢量增加，同时焊嘴高度增加使电弧空间增加，氩气保护效果减弱使吸氢增加；

② 电弧电压　电弧电压过低或过高均引起焊缝气孔增多，电弧电压较低时，阴极雾化区小，氧化膜不能充分破碎净化，使表面氢进入熔池。同时电弧电压较低时电弧不稳定，飞溅增加，氩气保护状态被破坏，使熔池氢含量增加。电弧电压过高时，电弧长度较长，熔滴在空间的停留时间增加，使熔滴吸氢增加。合适的电弧电压为21～22 V；

③ 焊丝　焊丝不同，焊缝气孔率不同，SAlMg5焊丝比SAlSi5焊丝的焊缝气孔率明显降低，Al－Mg合金固态下对氢的溶解度大，凝固时析氢少使焊缝气孔减少，另外，焊接时Al－Mg焊丝比Al－Si焊丝的焊接线能量高，熔池高温区停留时间较长，利于气泡溢出；

④ 脉冲电流参数　峰值电流要高于出现大滴过渡的临界值，一方面保证良好的熔滴过渡，同时可获得一定的峰值电压使阴极破碎效果提高，基值电流在保证不出现熄弧的前提下应选择较小值，以降低电弧温度。脉冲频率应在100 Hz左右，频率过高，峰值电流无停顿，脉冲有效性降低，频率过低，基值电流期间电弧不稳定；

⑤ 焊枪　采用水冷焊枪可有效降低焊丝端部温度，降低熔滴过渡温度，减少熔滴吸氢。

(5) 熔化极双层气流保护焊

采用双层气流保护可提高气体保护效果，双层气流喷嘴由两个同心的喷嘴组成，气流分别从内外喷嘴流出，如图4.7-18所示，此时，两层保护气可为同种气体，但流量不同，需合理配置。一般内层气体流量与外层气体流量的比例为1-2，效果较好。

(6) 双丝熔化极惰性气体保护焊

双丝熔化极惰性气体保护焊是适应铝及铝合金高效焊接要求产生的。焊接原理见图4.7-19，双丝分为消耗电极焊丝和填充焊丝，消耗电极焊丝在前，填充焊丝在后，在消耗电极形成的熔池内插入填充焊丝，由熔池热量熔化填充焊丝。

双丝熔化极惰性气体保护焊的技术关键是：①填充焊丝分流电流较大。若分流过大，电弧会被洛仑兹力过分吹向前方而不能焊接；若分流过小，电弧不能被推向前方，填充焊丝被电弧熔化而不能顺利插入熔池。可采用可变电阻调整分流电流；②两电极之间的间距。对分流电流和填充焊丝熔化量有较大影响。

双丝熔化极惰性气体保护焊的特点是：①焊丝熔化速度提高；②熔池温度降低；③焊接速度比普通熔化极惰性气体保护焊提高两倍以上；④普通熔化极惰性气体保护焊易产生皱折，双丝熔化极惰性气体保护焊可消除皱折；⑤和普通熔化极惰性气体保护焊相比，双丝熔化极惰性气体保护焊的烧穿敏感性小，薄板或有凸凹缺口的材料也容易施焊。

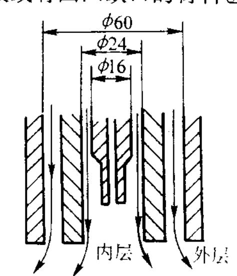


图 4.7-18　双层气流保护示意图

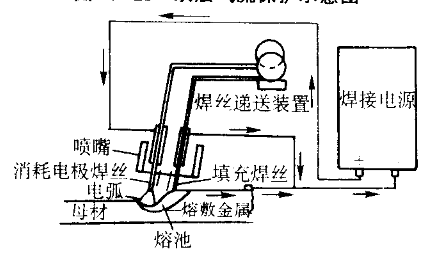


图 4.7-19　双丝熔化极惰性气体保护焊原理

1.2.8　真空电子束焊

真空电子束焊能量密度高，为氩弧焊的60～600倍，真空保护条件好，特别适合于铝及铝合金焊接。真空电子束焊接头的形状系数大，热影响区小，焊缝纯度高，焊接变形小，力学性能好，大厚度、超大厚度（＞150～200 mm）的铝合金对接接头不开坡口可一次焊成。但焊件尺寸受真空室容积的限制。为解决大型构件的真空电子束焊接问题，出现了局部真空电子束焊接方法。

(1) 焊接性

铝及铝合金真空电子束焊焊接性见表4.7-33。

表 4.7-33　铝及铝合金真空电子束焊接性

合金种类	合　金	焊 接 性
非热处理强化变形铝及铝合金	Al99.5 AlMn1 AlMg3 AlMg5	好 好 热裂倾向 好，Mg蒸发，焊缝气孔倾向
热处理强化变形铝及铝合金	AlMgSi1 AlCuMg2 AlZnMgCu	好 好 不合适，Zn、Mg蒸好，气孔，热裂纹
非热处理强化铸造铝及铝合金	G－AlSi12 G－AlSi9Cu3 G－AlMg5	好 好 好，Mg蒸发，焊缝气孔倾向
热处理强化铸造铝及铝合金	G－AlSi7Mg	好



续表 4.7-33

合金种类	合 金	焊 接 性
热处理强化铸造铝及铝合金	G - AlMg5Si G - AlCu4Ti GD - AlSi8Cu3	好，Mg 蒸发，焊缝气孔倾向 热裂倾向 焊缝气孔

(2) 接头设计

铝及铝合金真空电子束焊接头设计见图 4.7-20。

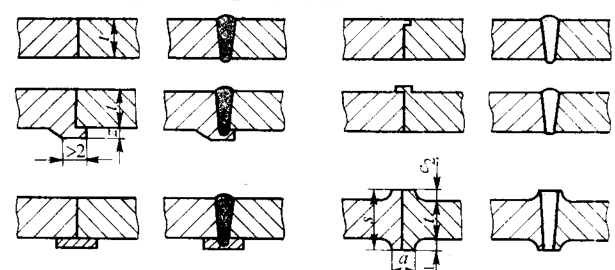


图 4.7-20 真空电子束焊接接头设计

(3) 焊接缺陷及防治

铝及铝合金真空电子束焊接缺陷包括冶金缺陷、成形缺陷和特殊缺陷三类。

1) 冶金缺陷 冶金缺陷包括焊接裂纹、焊缝气孔、合金元素烧损和热影响区内的金属分层。

① 焊接裂纹 铝及铝合金真空电子束焊接裂纹包括焊缝中央和熔合线纵向裂纹、焊缝金属和近缝区横向裂纹、弧坑裂纹和缩孔裂纹。

产生焊接裂纹的可能原因有：(a) 母材的焊接裂纹敏感性较大；(b) 晶界含有大量共晶体；(c) 母材中有害杂质含量较高；(d) 合金元素损失较多；(e) 多次熔化焊缝金属；(f) 接头设计不合理，存在应力集中；(g) 多层焊；(h) 焊缝金属和近缝区温度梯度过大；(i) 焊接规范参数不合适。

防止焊接裂纹的措施有：(a) 选用焊接裂纹敏感性低的铝合金；(b) 原材料制造时降低合金中的有害杂质；(c) 减少合金元素损失；(d) 填加焊丝；(e) 接头设计合理，降低或消除应力集中；(f) 单道一次完全焊透；(g) 焊缝重熔时填加焊丝；(h) 选择正确的焊接规范参数和焊接顺序。

近缝区内的裂纹无法消除。

② 焊缝气孔 铝及铝合金真空电子束焊缝气孔包括：焊缝金属中均匀分布的气孔、熔合线气孔、焊缝表面气孔。

产生焊缝气孔的可能原因有：(a) 母材含有大量溶解气体、杂质；(b) 焊接坡口和焊丝表面焊前清理不干净；(c) 焊接坡口表面存在裂缝和凹坑；(d) 焊缝根部未焊透；(e) 母材中含有大量高蒸气压的合金元素；(f) 水平位置焊接，熔深很大；(g) 焊接规范参数不合适。

防止焊缝气孔的措施有：(a) 原材料在冶金生产时进行净化和除气；(b) 采用和氢生成化合物的元素对母材和焊丝进行合金化；(c) 焊接坡口和焊丝表面应清理干净，包括污物和氧化膜；(d) 焊接规范参数合适，熔池的空间位置利于气泡溢出（立焊）；(e) 电子束沿焊缝轴向振动或用小直径圆扫描；(f) 重熔焊缝（需调整规范参数）。

各类焊缝气孔均可防治。

③ 合金元素烧损 合金元素大量汽化烧损会降低接头性能、增加焊接裂纹和焊缝气孔敏感性。

造成合金元素烧损的可能原因有：(a) 焊接速度太低；(b) 真空度太高；(c) 焊接规范参数不合适，引起液态金属表面增大、在高温和真空下停留时间较长；(d) 排除缺陷时多次重熔。

防治合金元素烧损的措施有：(a) 采用较快的焊接速度，保证液态金属在真空条件下停留时间短；(b) 真空度较高时，电子枪采用差动抽空；(c) 填加含有易挥发元素的焊丝；(d) 排除缺陷时焊接速度要大，必要时可填丝。

④ 热影响区金属分层 造成热影响区金属分层的可能原因有：母材中有与冶金生产有关的缺陷，如折叠、氧化膜、非金属夹杂、气体缩孔、分层和化学不均匀性。

防治热影响区金属分层的措施有：提高母材质量检验的要求。

这类缺陷工艺上无法排除。

2) 成形缺陷 成形缺陷包括咬边、余高不均匀、焊瘤、无余高或凹陷、针状小气孔、缩孔、飞溅和变形严重。

① 咬边 产生咬边可能的原因有：(a) 电子束功率较大和焊接速度不匹配；(b) 送丝速度小；(c) 焊接时电子束摆动。

预防或者排除缺陷的措施有：(a) 调整规范参数，例如电子束功率，焊接速度，送丝速度；(b) 改变电子束摆动特性；(c) 焊缝重复熔化时，采用较大直径电子束。

② 余高不均匀 产生余高不均匀可能的原因有：(a) 在焊接过程中，聚焦斑点相对接头表面的位置发生了变化；(b) 沿对缝长度，间隙不均匀；(c) 送丝速度不均匀或者卷焊时卷边高度不均匀；(d) 焊接过程中产品或者电子枪的移动不均匀。

预防或者排除缺陷的措施有：(a) 保证焊接过程参数的稳定；(b) 检查焊前毛坯的准备质量和装配质量；(c) 排除产品、电子枪和送丝机构移动装置的故障。

③ 焊瘤 产生焊瘤可能的原因有：(a) 卷边焊时卷边宽度太大；(b) 送丝速度较大；(c) 横向焊缝施焊时，焊接速度太小；(d) 基本金属中含气量过高，或者焊接坡口存在多余物而引起液态金属飞溅使熔池沸腾。

预防或者排除焊瘤的措施有：(a) 减少卷边宽度；(b) 协调送丝速度或者焊接速度；(c) 提高焊接坡口的准备质量；(d) 检查焊接毛坯材料含气量和非金属夹杂含量；(e) 采用散焦束或者电子束的圆扫描施焊一道修饰焊缝。

④ 凹陷 产生凹陷可能的原因有：(a) 电子束功率较大；(b) 对缝间隙太大；(c) 送丝速度不够；(d) 大厚度的水平位置焊接。

预防或者排除凹陷的措施有：(a) 协调电子束功率和送丝速度；(b) 送丝以形成余高，重复施焊。

⑤ 焊缝正面的针状小气孔 产生针状小气孔可能的原因有：(a) 能量密度过于集中；(b) 电子束功率不够，不能完全焊透，形成背面焊波；(c) 采用摆动电子束，沿焊缝轴线，纵缝进行焊接；(d) 电子枪短时间的击穿。

预防或者排除针状小气孔的措施有：(a) 协调电子束功率参数，选择不产生针状气孔时电子束的摆动频率，排除电子枪内产生击穿的原因；(b) 进行重复熔敷，以保证完全焊透，形成背面焊波。

⑥ 搭接缩孔 产生搭接缩孔可能的原因有：(a) 焊接熔池大，焊缝金属结晶过程中收缩；(b) 零件之间的间隙太大；(c) 散焦电子束焊接。

预防或者排除搭接缩孔的措施有：(a) 协调焊接过程的基本参数：电子束聚集和焊接速度；(b) 保证被连接元件的优质装配。

这是一种难发现的缺陷，不是在所有情况下可以排除，因为具有隐蔽特征。

⑦ 飞溅 产生飞溅可能的原因有：(a) 基本金属中的含气量，非金属夹杂和氧化物含量太大；(b) 电子束功率偏高；(c) 焊接坡口表面清理不好；(d) 斑点相对被焊毛坯表面位置的选择不正确。

预防或者排除飞溅的措施有：(a) 检查基本金属的含气量和各种不同夹杂；(b) 调整电子束功率和聚集规范参数；



(c) 提高焊接坡口准备质量。

3) 特种缺陷　特种缺陷包括根部未焊透或根部刀状缺陷、深弧坑、层间未熔合、熔透明显减少，焊缝宽度加大，可能有裂纹等。

① 根部未焊透或根部刀状缺陷　产生缺陷可能的原因有：(a) 加热斑点的能量密度过高；(b) 对缝没有完全焊透，或者金属内气体和蒸汽不能从两面溢出。

预防或者排除缺陷的措施有：(a) 降低加热斑点的能量密度；(b) 焊接接头结构的设计，使之完全焊透，将有根部缺陷的焊缝部分移至垫板、工艺环，或者其他零件，避开焊缝基本部分的截面范围；(c) 在被焊的其中一个零件的焊缝下面设计沟槽、凹槽、空隙，使金属气体和蒸汽能从两面溢出，在空腔内形成背面焊缝。

② 深弧坑　产生缺陷可能的原因有：(a) 电子枪击穿；(b) 供电中断；(c) 产品或者电子枪移动机构停顿或者卡住；4 基本金属内非金属或者氧化物夹杂，呈局部堆积状进入电子束下端。

预防或者排除缺陷的措施有：(a) 排除电子枪内引起击穿的原因；(b) 排除电源中断的可能原因；(c) 检查和排除产品和电子枪移动机构的可能故障；(d) 研制工艺过程的补充措施；(e) 填丝和电子束扫描进行二次熔化。

③ 层间未熔合　产生缺陷可能的原因有：(a) 用尖聚集电子束焊接；(b) 液态金属体积小，熔池尺寸受限制；(c) 焊接速度太快；(d) 焊接金属的导热性高，或者在焊接区存在强烈散热；(e) 重复焊接或者再次重熔；(f) 电子枪击穿。

预防或者排除缺陷的措施有：(a) 利用电子束少许散焦，并增大电子束功率来增大熔池的体积；(b) 减小焊接速度；(c) 选择规范参数，保证熔合区的形状具有实际上的平行熔合线；(d) 采用电子束扫描进行焊接，特别是在再次重熔时。

④ 熔透明显减少，焊缝宽度加大，可能有裂纹　产生缺陷可能的原因有：(a) 在电子枪或者真空室的工作空间内，偶尔产生辉光放电激励和形成的现象；(b) 由于阴极被金属蒸气饱和，电子束束流自行减少；(c) 阴极加热温度减低；(d) 电子枪内进入大量金属蒸气和油蒸气；(e) 真空室和真空室内的其他装置被汽化凝结元素污染，重复抽真空时，这些元素升华。

预防或者排除缺陷的措施有：(a) 电子枪采用差动抽真空进行焊接；(b) 采用折弯或者倾斜的电子束轨迹进行焊接；(c) 采用保护屏蔽，防止电子枪的阴极组件区直接进入蒸气；(d) 真空室内的工作空间保持真空卫生，及时清理真空室以及真空室内其他装置上的挥发污染物；(e) 焊接毛坯表面的污染；(f) 产品上存在酸洗的残留物（碱）；(g) 设备的抽真空系统效率不够，真空系统的油蒸气进入到真空室；(h) 阴极加热和轰击电流参数太低。

1.2.9　变极性等离子弧焊

变极性等离子弧焊是铝及铝合金的先进焊接技术，和传统的焊接技术相比，焊接质量提高，焊接成本下降。传统的铝及铝合金焊接方法如 TIG 已成功使用多年，技术上也取得较大进步，但对于要求较高的焊缝，例如航天工业，传统方法仍然存在接头几何形状不良和内部缺陷等较多问题，补焊成本较高。接头几何形状不良是由熔透控制不良和电弧不稳造成的。内部缺陷是由于表面清理不良和氧化膜造成的。

(1) 变极性等离子弧焊工作原理

变极性等离子弧焊接是一种小孔向上立焊、电流波形正负半波幅值和时间分别可调的铝及铝合金焊接技术，工作原理见图 4.7-21。

单纯的直流正接或直流反接等离子弧焊，虽然也是小孔焊接，但易出现切割、焊缝气孔、熔合不良等缺陷，用于铝及铝合金焊接不理想。交流等离子弧焊同样不理想，因为钨极烧损严重、不能控制焊接熔池、需要叠加高频、降低焊枪电流容量。

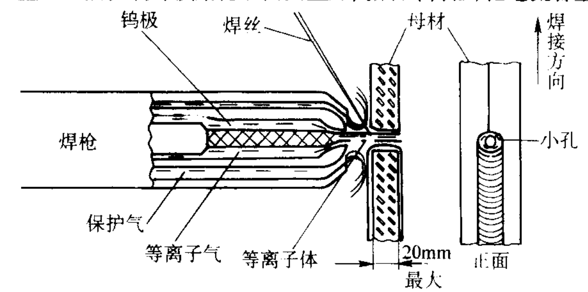


图 4.7-21　变极性等离子弧焊工作原理

变极性等离子弧焊有两个特点，一是等离子弧，二是变极性。等离子弧和普通电弧有明显不同，焊接时普通电弧的喷射速度为 80 ~ 150 m/s，等离子弧的喷射速度为 300 ~ 2 000 m/s，高的等离子弧喷射速度是被加热气体通过拘束喷嘴产生的，等离子弧焊枪是一种小型喷气发动机。而普通电弧喷射是靠电弧中运动电荷产生电弧电流，电弧电流产生的磁场作用下形成的。由于等离子弧焊喷射速度高，等离子体驻点压力大，焊接熔池容易形成小孔。等离子弧小孔焊接有以下优点：①等离子体对污染不敏感，通过小孔等离子体冲刷容易带走熔池中可能形成气孔的气体；②小孔焊接在焊接厚度上的对称加热可减少角变形；③大的熔深可减少焊道数量。变极性等离子弧焊焊接铝合金有优点：①基本无焊缝气孔；②大多数铝合金焊前表面清理要求不高；③可减少角变形。焊接厚度使用范围是 3.6 ~ 26 mm。

变极性等离子弧焊电流波形见图 4.7-22。焊接电流参数有：正半波电流幅值和时间，负半波电流幅值和时间。负半波电流幅值比正半波电流幅值大 30 ~ 80 A，但负半波时间很短，一般为 2 ~ 5 ms，可以获得极好的阴极雾化效果，同时对钨极和喷管的热作用最小。正半波时间一般为 15 ~ 20 ms。当负半波时间少于 2 ms 时，焊缝气孔较多，焊缝质量较差，当负半波时间大于 6 ms 时，钨极烧损严重，易出现双弧，焊缝质量无明显改善。

由于电弧能量 2/3 产生在阳极，当钨极和喷管为负极（DCEN）时比为正极（DCEP）时可承受更高的电流值而不会过热。正弦波和方波电流时，钨极和喷管 50% 处于正极，易产生过热，大大限制了变极性等离子弧焊枪的电流容量。而变极性电流时，钨极和喷管 86% ~ 92% 处于负极，不易过热，可提高焊枪的电流容量，同一焊枪可焊接更厚的材料。同时电弧稳定，不需叠加高频。

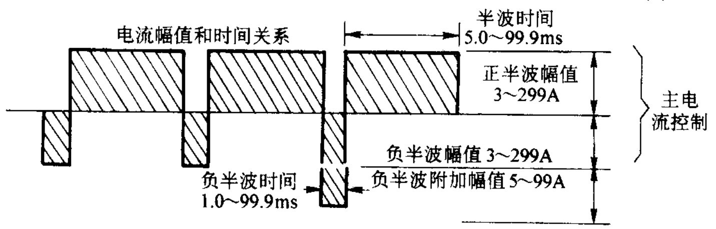


图 4.7-22　变极性等离子弧焊电流波形



（2）焊接工艺

1）接头设计　变极性等离子弧焊的接头应设计为平口对接，不需开坡口。可一次焊透的铝及铝合金最大厚度为 20 mm。由于是平口对接一次焊透，所用焊丝少，焊道少，总焊接时间短。对装配错边和根部间隙有要求，对于6.3 mm 的铝合金板，最大装配错边为 2.0 mm，最大根部间隙为 1.0 mm。焊缝余高最大为板厚的 1/3。

2）表面清理　为减少焊缝气孔和夹杂，焊接表面应清理干净，包括去除油脂和氧化膜。对于变极性等离子弧焊，大多数铝合金不需要去除氧化膜，但对于 5xxx 合金，必须去除氧化膜，因为这种氧化膜附着力极强。

3）辅助机构　辅助机构包括使焊枪和工件作相对运动的机构、工件装卡机构。辅助机构应是刚性的，运动速度恒定，小孔背后应有足够的空间让离子气体跑出，而不会干扰焊接熔池。背面无须惰性气体保护。辅助机构运动需要启动/停止时间延迟器。

4）送丝　采用传统的送丝机构，送丝速度为 25 ~ 250 mm/min，焊丝从小孔前沿加入，类似于自动氩弧焊，需要启动/停止时间延迟器。

5）焊接参数　焊接参数的选择和材料类型、厚度、焊接位置有关。厚度在 6.4 mm 以下的板材可采用平焊、立焊、仰焊。立焊时最大焊接厚度为 20 mm。表 4.7-34 为立焊位置焊接参数。

表 4.7-34　铝合金变极性等离子弧立焊焊接参数

项　目	数		据		
材料厚度/mm	4.8	6.4	7.9	9.5	12.7
铝合金型号	6061	3003	5052	2219 - T87	5 454
焊丝牌号（直径 1.6 mm）	5 356	2 319	5 356	2 319	5 556
焊丝速度/mm·min⁻¹	10	838	990	838	1 118
正半波电流/A	100	155	190	220	270
正半波时间/ms	19	19	19	19	19
负半波电流/A	170	225	260	270	340
负半波时间/ms	4	3	4	4	3
离子体 1 气流/mL·h⁻¹	Ar24.6	Ar32.8	Ar32.8	Ar32.8	Ar32.8
离子体 2 气流/mL·h⁻¹	Ar82	Ar82	Ar82	Ar82	Ar131
保护气流/mL·h⁻¹	He656	Ar574	Ar/He656	Ar574	He656
电极直径/mm	3	3	3	3	4
焊接速度/mm·min⁻¹	254	228.6	159	152.4	152.4

（3）接头质量

1）焊接变形　采用变极性等离子弧平口对接小孔一次焊透获得的焊缝焊接变形很小。焊接能量通过小孔全面加热焊道，在厚度方向上热分布均匀，而 TIG 焊仅加热工件表面，热分布不均匀，焊接变形较大。

2）焊缝气孔　采用变极性等离子弧平口对接小孔立焊一次焊透获得的接头焊缝气孔几乎没有。小孔向上立焊为气体从溶池中逸出创造了最有利的条件。

3）典型材料接头力学性能　2219 - T87 铝合金厚度 6.4 mm，2319 焊丝，单道变极性等离子弧焊。在焊缝余高的角部存在富铜区，深度约为 0.03 ~ 0.08 mm，Cu 含量为 30% ~ 35%，组成为 CuAl2（θ）+ Al（α）。这一区域脆性较大，应力集中较高，裂纹易从此处萌生和扩展。焊后态的拉伸强度为 263.5 ~ 278.8 MPa，延伸率为 4.2% ~ 5.0%，机械去除正背面余高角处的富铜区后，拉伸强度提高为 285.7 ~ 297.4 MPa，延伸率为 5.4% ~ 6.3%。

2219-T87 铝合金厚 9.5 mm，变极性等离子弧焊的规范参数为：焊接电流：正半波幅值 195 A，时间 19 ms，负半波幅值 200 A，时间 4 ms；焊接电压：正半波幅值 32.5 V，时间 19 ms，负半波幅值 40 V，时间 4 ms；焊接速度：203 mm/min；送丝速度：965 mm/min，保护气体 574 mL/hHe，离子气 123 mL/hAr。TIG 焊接参数：焊接电流 210 A、焊接电压 12.5 V，焊接速度 172 mm/min，保护气体 164 mL/h，He。变极性等离子弧焊和 TIG 焊接 2219 - T87 时正背面余高基本一样，焊后态的拉伸强度基本一样，为 280 MPa，去余高后变极性等离子弧焊比 TIG 的拉伸强度高，分别为 260 MPa，255 MPa。

2219 - T851 合金，厚度 7 mm，采用直径为 1.6 mm 的 2319 焊丝，焊前进行正常的清理。接头强度为 261 MPa，接头延伸率为 5.15%。

1.2.10　激光焊

激光焊接能量密度高，焊接热影响区小，焊接变形小、柔性焊接性好。由于铝及铝合金对激光能量的吸收率较低，仅适合于小厚度铝及铝合金构件的焊接。随激光小孔模式焊接的发展，铝及铝合金对激光能量的吸收率大大提高，使焊接厚度有较大提高，已可焊接 5 mm 厚的铝及铝合金构件。由于激光焊接的特点，在各工业部门尤其是汽车工业有广泛的应用前景。

（1）焊接小孔

激光焊时激光功率 P，光点直径 D，焊接速度 V 存在关系：

$$T_V - T_0 = 4A_0 P\ (\alpha D/V)^{0.5}/\pi D^2 K$$

式中 T_V，T_0 分别是蒸发温度和环境温度；A_0 是材料初始吸收系数，对于铝合金 T_V = 2 740 K，A_0 = 1.9%，α = 8.41 m^2/s，K = 204 W/（m·K）。

铝合金激光焊接小孔的形成和激光功率 P，光点直径 D，焊接速度 V 有关。减小光点直径 D 影响明显，焊接速度 V 影响最小。由于光点直径 D 随焦距 f 和光点离表面的距离 Δf 增加而增加，宜选择短焦距镜头，减小 Δf。焊接 1 ~ 2 mm铝及铝合金时，功率为 2 ~ 3 kW，焊接速度为 20 ~ 150 cm/min，Δf = 0 mm；焊接 3 ~ 5 mm 铝及铝合金时，功率为 2 ~ 3 kW，焊接速度为 20 ~ 150 cm/min，Δf = 0.5 mm。

增加初始表面吸收系数 A_0 可增加吸收激光能量，利于形成小孔。表面发黑或氧化可提高 A_0，对于 6063 铝合金，激光功率为 2.7 kW，焊接速度为 75 cm/min，搭接接头表面不处理时熔深为 0.5 mm，表面发黑时熔深为 1.5 mm，表面氧化时熔深为 2.8 mm，对接时熔深为 3.0 mm。熔深增加表明初始表面吸收系数 A_0 增加。

形成小孔门槛值和激光功率的关系见图 4.7-23。

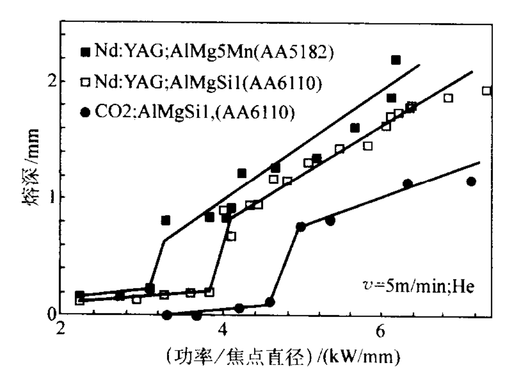


图 4.7-23　铝合金焊接小孔门槛值和功率的关系

激光波长和吸收率的关系见图 4.7-24。

能量效率是由偶合效率和热效率的乘积决定的。偶合效率是指工件吸收的能量和激光总能量的比值。形成小孔可大幅度提高偶合效率。热效率是指形成焊缝消耗的能量和工件



吸收的能量的比值。熔深和偶合效率的关系见图 4.7-25。功率/熔深和热效率的关系见图 4.7-26。

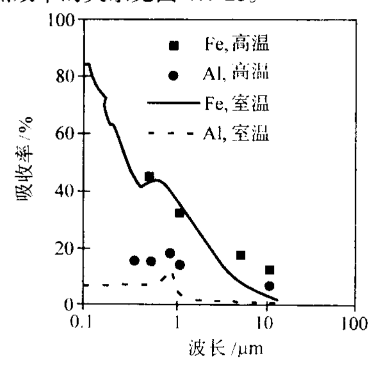


图 4.7-24 铝合金激光波长和吸收率的关系

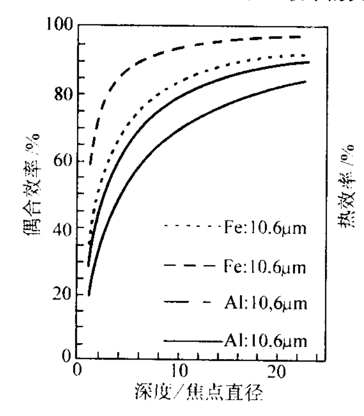


图 4.7-25 铝合金熔深和偶合效率的关系

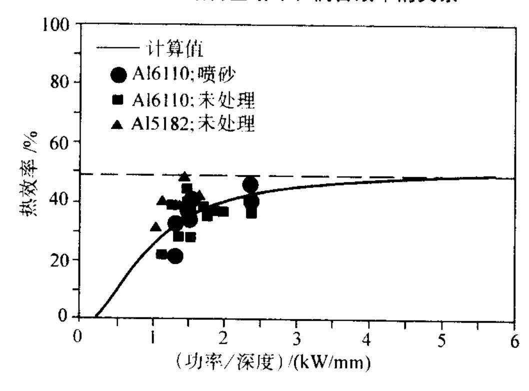


图 4.7-26 铝合金功率/熔深和热效率的关系

（2）焊接性

1）焊缝气孔　铝及铝合金激光焊焊缝气孔的形成原因有：(a) 焊接过程中吸收外界气体，结晶时气泡浮不出去形成气孔，主要是氢气孔；(b) 高能激光束形成的小孔不稳定和倒塌捕获气泡形成焊缝气孔。图 4.7-27 为焊接小孔捕获气泡过程，捕获的气体可能是金属蒸气和保护气体。

2）焊接裂纹　铝合金激光中容易发生结晶裂纹，较少发生液化裂纹，原因是激光热输入量小，焊接热影响区小。铝合金脉冲激光焊和连续激光焊相比，结晶裂纹敏感性更大，虽然脉冲焊可以减少热输入和成分偏析但增加冷却速度，应变较高，应力梯度较大，形成的裂纹不能被添满增加了结晶裂纹敏感性。

激光焊热裂敏感性较高的铝合金有：6xxx（AlMgSi1，AlMg0.6Si0.9，AlMg0.4Si1.2）、AA2024（AlCuMg2）、AA7075（AlZnMgCu1.5）、AA8090（AlLiCu）；热裂敏感性较低的铝合金有：AA1050（Al99.5），AA5754（AlMg3），AA5182（AlMg5Mn），AA5083（AlMg4.5Mn），铸铝 GK－AlSi11，GK－AlSi7Mg。

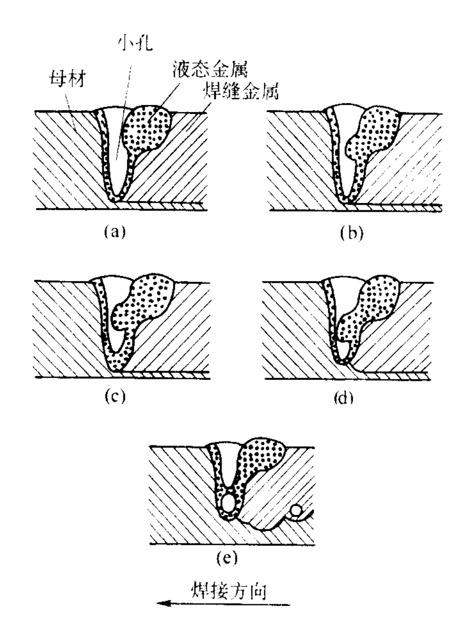


图 4.7-27 激光焊接小孔捕获气泡过程

铝合金激光焊接结晶裂纹与合金的化学成分和显微组织、焊接速度、焊接过程的热应变幅值和速率有密切关系。应从以下几个方面着手防止结晶裂纹。

① 改进焊接材料　5×××合金由于含镁量较高裂纹敏感性较小，2×××和6×××合金裂纹敏感性较大。连续激光焊时5×××不会产生结晶裂纹，2×××和6×××合金焊接时需采用 4043 和 4047 焊丝。

② 细化晶粒　细化晶粒可增加结晶裂纹开裂阻力，Ti 和 Zr 是有效的晶粒细化剂，其他技术如光束扫描，表面冷却也有效。

③ 优化脉冲激光焊接　脉冲激光焊接对细化晶粒很有效，也利于焊接过程柔性化，但它的高冷却速度和高凝固速度增加结晶裂纹倾向，必须优化脉冲参数，合适的脉冲形状和顺序可减少应变速率和促进开裂回填。

④ 减小热应变　热应变的决定因素有：焊接过程、热输入量、接头形式、被焊金属的热物理参数。减少拉伸应变的措施有：合理的接头形式和焊缝形状系数，通过增加热输入和降低焊接速度获取椭球形熔池。

⑤ 当速度超过 5～7m/min 易发生焊接热裂纹。

3）焊接孔洞　焊接孔洞不同于焊缝气孔，形状不规则，X 光可检测出来，位于小孔通道上，表面处理不能减少焊接孔洞的数量。双聚焦技术可消除焊接孔洞缺陷。

（3）焊接工艺

1）激光源　CO_2 激光器功率可达 20 kW，容易克服小孔形成门槛值，取得满意的能量效率。固体激光器功率可达 4 kW，优点是可用光导纤维传导，最小焦点直径为 0.3 mm。铝合金焊接厚度、激光器类型和焊接速度的关系见图 4.7-28。

2）保护气体　保护气体的作用是保护熔池不受氧化，可选用 Ar 气。使用 N_2 气有利于焊接稳定性。CO_2 激光焊时使用 He 气可避免等离子气对焊接过程的不利影响。固体激光焊时，等离子体很弱，不必采取防护措施。保护气体的另一重要作用是防止烟尘和飞溅污染镜头

3）典型材料的激光焊接　可用激光焊接的材料有 2008、2010、5083、5082、5252、5454、5754、6009、6060、6061、6082 和 6111。材料的焊接厚度为 1.0～2.5 mm，CO_2 激光焊的功率为 4～6.8 kW，固体激光器的功率为 2～3 kW，焊接速度为 0.9～7.0 mm/min，在大多数情况下，2×××和6×××



合金激光焊时采用4047焊丝防止焊接热裂纹，5×××合金不填丝或采用5554焊丝防止Mg在焊接过程中的损失。

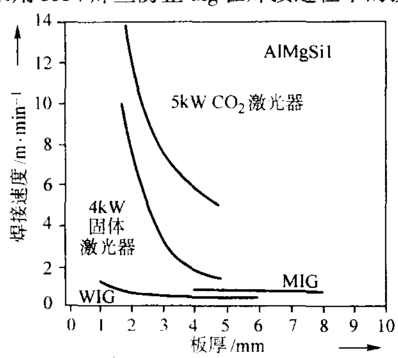


图 4.7-28　铝合金焊接厚度、激光器类型和焊接速度的关系

5×××合金激光焊不填丝对接焊时，接头强度系数为0.9，强度随Mg含量的增加而增加，拉伸断裂发生在焊缝熔合线上。填加5554焊丝时，可增加接头强度和延伸率，部分断在母材上。

6×××合金激光焊不填丝对接焊时，接头强度系数为0.6，拉伸断裂发生在热影响区。填加4047焊丝激光对接2×××和6×××时接头强度和母材的最低强度值一样。焊后时效处理可有效提高焊接热影响区的硬度，但熔合区硬度变化不大，强度增加但延伸率明显下降。搭接接头强度较低，接头强度系数为0.34～0.7。

2090合金，厚度为1.6 mm，采用 CO_2 激光焊机，功率为1.3 kW，焊接速度为42.33～254 mm/s，氩气保护，氩气压力为68 947.6 Pa，间隙为0.024 5～0.254 mm。不作任何表面处理时接头强度系数为0.55，焊接区母材表面机械加工去除0.127 mm时接头强度系数为0.82。

AlMg0.4Si1.2＋AlMgSi0.5搭接，激光源：Nd：YAG固体激光器，功率3 kW，波长1.06 m，光纤直径600 μm，保护气体：Ar/He/N2；六自由度机器人。在机械臂和聚焦镜之间使用柔性运动夹具装置，使得焦点位置和焊丝的相对位置恒定，加紧力使得搭接间隙最小。传统送丝机构，焊丝直径1.0 mm，送丝速度为50 m/min，焦距为＋0.6～－0.6 mm。搭接间隙工艺余度为0.4 mm。通常光束应垂直于焊接表面，在必要的时候，偏角可达30°。填丝以＋/－90°双丝填入为最好，可取得良好的焊缝成形，良好的能量匹配。

Al-1.46Li-1.73Cu-1.08Mg，淬火态，CO_2 激光焊接，功率分别使用2 kW和2.5 kW，焊接速度分别为4 m/min和7 m/min，He气保护，小孔焊接模式。焊缝和焊接热影响区窄，气孔较少。在焊缝中心和熔合线附近为等轴晶，在过渡区域为柱状晶。焊后进行双级热处理（550/2/175/8）可明显提高焊缝的屈服强度约380 MPa，延伸率为17%。

A5182P-0铝合金成分为Al-4.55Mg-0.29Mn，厚度7 mm，母材延伸率24%，CO_2 激光焊机，功率5.5 kW，当激光功率5 kW时，焦点位置-1 mm，Ar气保护（$5.0\times10^5 mm^3/s$），焊接速度分别为25、50、75 mm/s时，接头强度系数分别为0.92、0.93、0.99，接头延伸率为14%、16%、24%。

1.3　铝及铝合金的钎焊

铝及铝合金钎焊难度较大，现代钎焊技术的发展已可以满足铝及铝合金钎焊结构及制品发展的需求，钎焊技术已广泛应用于各种铝及铝合金热交换器、蜂窝结构、电子器件、电器元件和轻工制品的生产中。

（1）铝及铝合金的钎焊性

1）氧化膜　铝及铝合金钎焊时氧化膜妨碍液态钎料润湿母材。采用零件表面清理技术或钎剂，多数铝合金可以解决氧化膜问题。对Mg超过1%（质量分数）的铝镁合金和Si超过3%（质量分数）的铝硅合金来说，目前无合适钎剂清除氧化膜。

2）过烧　钎焊硬铝类铝合金时母材易发生过热，严重软化甚至过烧。母材熔化温度和钎料熔化温度相差不大，必须严格控制钎焊温度，加热温度偏差较大，或无熔点合适的钎料时，存在母材过烧危险。

3）耐腐蚀性差　钎料和母材化学成分相差较大，产生电极电位差，钎焊接头易发生电化学腐蚀。通过钎料优选，使从母材到钎缝的电极电位过渡平缓有助于提高钎焊接头的耐腐蚀性。

铝及铝合金钎焊性见表4.7-35。

表 4.7-35　铝及铝合金材料的钎焊性

材料	熔化温度范围/℃	主要成分（质量分数）/%	软钎焊	硬钎焊
1070A、1060	-660	A＞99	优	优
3A21	643～654	Mn1.3，余量Al	优	优
5A01	634～654	Mg1，余量Al	良	优
5A02	627～652	Mg2.5，Mn0.3，余量Al	困难	良
5A03	—	Mg3.5，Mn0.45，余量Al	困难	差
5A05	568～638	Mg4.7，Mn0.45，余量Al	困难	差
2A11	515～641	Cu4.3，Mg0.6，Mn0.6，余量Al	差	差
2A12	505～638	Cu4.3，Mg1.5，Mn0.6，余量Al	差	差
6A02	593～651	Cu0.4，Mg0.7，Si0.8，余量Al	良	良
7A04	477～638	Cu1.7，Mg2.4，Zn6，Mn0.4，Cr0.2，余量	差	差
ZAlSi12	577～582	Si12，余量Al	差	困难
ZAlCu5MnA	549～582	Cu5，Mn0.8，Ti0.25，余量Al	良	困难
ZAlMg10	525～615	Mg10.5，余量Al	差	差

（2）钎焊材料

1）软钎料　铝及铝合金软钎料分为低温、中温、高温三类，软钎料特点和部分国内外软钎料化学成分见表4.7-36、表4.7-37。

表 4.7-36　铝的软钎料特点

钎料	熔点范围/℃	钎料成分	操作	润湿性	强度	抗腐蚀性	对钎焊金属的影响
低温软钎料	150～260	Sn-Zn系 Sn-Pb系 Sn-Zn-Cd系	容易	较差	低	差	无影响
中温软钎料	260～370	Zn-Cd系 Zn-Sn系	中等	优秀 良好	中	中	热处理合金有软化现象
高温软钎料	370～430	Zn-Al Zn-Al-Cu	较难	良好	好	好	热处理合金有软化现象

表 4.7-37　国内外的部分软钎料

钎料类别	化学成分（质量分数）/%						熔化温度/℃
	Zn	Cd	Sn	Pb	Cu	Al	
锌-锡钎料	58±2		40±2		2±0.5		200～350
	10		90				200
锌-镉钎料	60±2	40±2					266～335
锌-铝钎料	72.5±2.5					27.5±2.5	430～500
	65				15	20	415～425
锡-铅钎料	9±1	9±1	31±2	51±2			150～210



铝及铝合金低温软钎料有锡－锌合金，铅－铋合金。Sn91Zn9是锡－锌共晶合金，熔点约205℃，润湿性好，漫流性好，耐蚀性好。一般不采用锡－铅钎料，耐腐蚀性较差。锡－铅钎料中加少量锌或镉，可改善钎焊特性和耐蚀性。

铝及铝合金中温软钎料有锡－锌合金，镉－锌合金。Zn含量为30%～90%（质量分数），合金中含铅、铋、银、镍、铜、铝等元素，常用钎料有Sn70Zn30、Zn70Sn30、Zn60Sn40，含锌量较高，润湿性好，焊脚较大。中温软钎焊比低温软钎焊接头强度高，耐腐蚀好。

铝及铝合金高温软钎料Zn含量为（质量分数）90%～100%，含少量银、铝、铜、镍等元素，以降低钎焊温度，展宽熔化温度区间，改善润湿性。高温软钎焊接头强度高，从母材到钎缝电极电位过渡平缓，接头耐腐蚀性能较好。高温软钎料内应尽量不含铅、锡、铋以及其他低熔点金属元素，原料锌应具有高纯度，至少99.99%。

为便于软钎焊，可采用软钎料和软钎剂合成的软钎焊材料。

软钎料接头耐腐蚀性能水平较低，为满足使用要求，对软钎焊接头涂防蚀层，或用镀层软钎焊，方法是用电镀、化学渡或真空镀等方法在母材上镀铜、银或镍，镀层厚度15～25 μm，再进行软钎焊。

2）硬钎料　铝及铝合金硬钎料基本上是铝基钎料，特别是Si含量为7%～12%的铝－硅合金钎料。Al－Si合金钎料内添加铜和锌可降低钎料熔点，但耐腐蚀性降低。真空钎焊钎料内应含有镁，w（Mg)范围为1%～3%。国内外铝及铝合金硬钎料相关数据见表4.7-38、表4.7-39、表4.7-40。配用的硬钎剂见表4.7-43。

表4.7-38　铝基钎料化学成化（摘自GB/T 13815—1992）

牌号	合金元素（质量分数）/%									其他元素总量
	Al	Si	Cu	Zn	Fe	Mg	Cr①	Ti①	Mn①	
BA188Si	余量	11.0～13.0	<0.30	<0.20	<0.8	<0.10①	—	—	<0.05	≤0.15
BA190Si	余量	9.0～11.0	<0.30	<0.10	<0.8	<0.50①	—	0.20	<0.05	≤0.15
BA192Si	余量	6.8～8.2	<0.25	<0.20	<0.8	—	—	—	<0.10	≤0.15
BA167CuSi	余量	5.5～6.5	27～29	<0.20	<0.8	—	—	—	<0.15	≤0.15
BA186SiCu	余量	9.3～10.7	3.3～4.7	<0.20	<0.8	—	<0.15	—	<0.15	≤0.15
BA186SiMg	余量	11.0～13.0	—	<0.20	<0.8	—		—	<0.15	≤0.15
BA188SiMg	余量	9.0～10.5	—	<0.20	<0.8	—		—	<0.10	≤0.15
BA189SiMg	余量	9.5～11.0	—	<0.20	<0.8	0.20～1.0		—	<0.10	≤0.15
BA190SiMg	余量	6.8～8.2	—	<0.20	<0.8	2.0～3.0		—	<0.10	≤0.15

① 元素可不分析，供方保证其他成分范围，铝钎料供应规格有条状、丝状、带状和粉末状多种形式。

表4.7-39　铝基钎料熔化温度（参考值）

牌号	固在线/℃	液相线/℃	牌号	固在线/℃	液相线/℃	牌号	固在线/℃	液相线/℃
BA188Si	577	580	BA167CuSi	525	535	BA188SiMg	559	591
BA190Si	577	590	BA186SiCu	520	585	BA189SiMg	559	592
BA192Si	577	615	BA186SiMg	559	579	BA190SiMg	559	607

表4.7-40　美国钎焊铝合金用的钎料的成分、固相线和液相线温度和钎焊温度范围

AWS型号	成分①（质量分数）/%						温度/℃		
	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Fe	固相线	液相线	钎焊温度范围
BAlSi－2	6.8～8.2	0.25	—	0.20	0.10	0.8	577	613	599～621
BAlSi－3②	9.3～10.7	3.3～4.7	0.15	0.20	0.15	0.8	521	585	571～604
BAlSi－4	11.0～13.0	0.30	0.10	0.20	0.15	0.8	577	582	582～604
BAlSi－5③	9.0～11.0	0.30	0.05	0.20	0.05	0.8	577	590	588～604
BAlSi－6④	6.8～8.2	0.25	2.0～3.0	0.20	0.10	0.8	559	607	599～621
BAlSi－7④	9.0～11.0	0.25	1.0～2.0	0.20	0.10	0.8	559	596	587～604
BAlSi－8④	11.0～13.0	0.25	1.0～2.0	0.20	0.10	0.8	559	579	582～604
BAlSi－9④	11.0～13.0	0.25	0.10～0.5	0.20	0.10	0.8	562	582	582～604
BAlSi－10④	10.0～12.0	0.25	2.0～3.0	0.20	0.10	0.8	559	582	582～604
BAlSi－11④⑤	9.0～11.0	0.25	1.0～2.0	0.20	0.10	0.8	559	596	582～604

① 主要合金元素。
② w（Cr）=0.15%。
③ w（Ti）=0.20%。
④ 在真空里使用时固相线和液相线温度范围是可变的。
⑤ w（Bi）=0.02%～0.20%。



复杂结构钎焊，可采用钎料预包覆在铝及铝合金表面的钎焊板。钎焊板有一面或双面钎料包覆层，特别适于钎焊大面积钎焊结构如铝及铝合金热交换器。使用钎焊板，钎焊温度应尽可能低，钎焊过程应尽可能短，因为 482℃以上长时间缓慢加热，包覆层内的硅将向钎焊板芯层母材加速扩散，减少预定包覆层钎料量。国产钎焊板见表 4.7-41。

表 4.7-41　国产钎焊板

钎焊板牌号	基本金属（芯层）	包覆层	包覆层熔化温度范围/℃
LF63 - 1	3A21	Al -（11 - 12.5）Si	577 ~ 582
LT - 3	3A21	Al -（6.8 - 8.2）Si	577 ~ 612

3）钎剂　钎剂分软钎剂和硬钎剂，分别和软钎料和硬钎料相匹配。

软钎剂按氧化膜去除方式分为有机钎剂和反应钎剂，均有腐蚀性，前者较弱，后者较强，见表 4.7-42。

表 4.7-42　铝用软钎剂

类别	牌号	组分（质量分数）/%	钎焊温度/℃	腐蚀性	导电性 钎剂	导电性 残渣
有机钎剂	剂204	Cd（BF_4）$_2$10，Zn（BF_4）$_2$2.5，$NH_4BF_4$5，三乙醇胺82.5	180 ~ 275	弱	中	低
反应钎剂	剂203	$ZnCl_2$55，$SnCl_2$88，NH_4Br15，NaF	280 ~ 350	强	高	高
		$SnCl_2$88，NH_4Cl 10，NaF_2	300 ~ 340	强	高	高
		$ZnCl_2$88，NH_4Cl 10，NaF_2	330 ~ 385	强	高	高

有机钎剂主要组分为三乙醇胺，加入氟硼酸或氟硼酸盐以提高钎剂活性，加热温度超过275℃三乙醇胺迅速碳化使钎剂丧失活性，钎焊温度不能超过275℃。为避免碳化，热源不宜与钎剂直接接触。有机钎剂活性较弱，钎料润湿性较差，不易流入间隙，可先涂敷钎料进行软钎焊，腐蚀性较弱，钎剂残渣对接头腐蚀不明显。

反应钎剂含有大量锌、锡等重金属氯化物，加热时，母材表面析出锌、锡等金属，可提高钎料润湿能力。反应钎剂因成分不同具有不同反应温度范围，钎焊温度与反应温度相适应。反应钎剂88$ZnCl_2$ - 10NH_4Cl - 2NaF的性能较好。使用反应钎剂，应预先将钎料和钎剂合置于待钎焊处，以防止钎剂失效。采用Zn60Cd、Zn58SnCu、Zn89AlCu和Zn95Al等钎料，必须采用反应钎剂。

反应钎剂去除氧化膜的作用机理是：钎焊温度下，钎剂熔化成离子溶液，其中的负离子（氯、氟离子）能迅速渗过氧化膜上的裂缝（氧化膜和母材线胀系数不同引起的）。铝为阴极，释放出电子，使金属铝变为正离子而被腐蚀：

$$4Al \longrightarrow 4Al^{+3} + 12e \quad (1)$$

氧化膜和母材的结合逐渐被破坏。同时，溶解在熔化钎剂中的氧获取铝释放的电子而成为负离子：

$$3O_2 + 12e^- \longrightarrow 6O^{-2} \quad (2)$$

这种氧化去极作用使得反应（1）能持续下去，氧化膜不断被清除。

熔化钎剂中的重金属正离子有去极化作用，Zn^{+2}，Sn^{+2}能从阴极获取铝释放的电子，以单质形式析出：

$$6Zn + 2 + 12e \longrightarrow 6Zn\downarrow \quad (3)$$

$$6Sn + 2 + 12e \longrightarrow 6Sn\downarrow \quad (4)$$

结果，在氧化膜不断被清除的同时，重金属锌、锡在钎焊区不断折出。

反应钎剂的作用机理表现在两个方面：一是能彻底去除氧化膜；二是具有改变钎缝区成分的冶金作用。

铝及铝合金硬钎剂见表4.7-43，基本组分为碱金属及碱土金属的氯化物及氟化物。氯化物使钎剂具有合适的熔化温度和黏度、氟化物有利于去除铝材表面氧化物，重金属氯化物有利于提高钎剂活性。

KF - AlF_3是全氟型不含氯化物的无腐蚀性硬钎剂（no - colok钎剂），熔化温度和化学成分控制精度有关，共晶成分时，熔点为558℃；略偏离共晶成分，熔点升高。QF型钎剂接近共晶成分，熔化温度为565℃左右。

合格的市售钎剂满足下列条件：加热到零件发生轻微氯化温度时开始熔化；熔化时基本呈熔融状态；在接头和钎料表面流布，使它们与氯化性气体隔绝；能穿透氧化膜；降低固态金属与液态金属之间的表面张力，促进润湿；保持液态直至钎缝完全凝固为止；钎焊过程结束后较易于清除。

炉中钎焊和火焰钎焊配用钎剂应能在比钎料熔化温度稍低的温度下熔化，以保证钎料在最短时间内均匀润湿和流布。盐浴钎焊配用钎剂在钎料熔化温度下应呈熔融状态且性能稳定，钎剂应只形成最少量的颗粒状沉积物。盐浴钎焊配用钎剂活性可比火焰钎焊或炉中钎焊配用钎剂活性稍低。

（3）钎焊工艺

① 钎焊接头设计　钎料和钎缝强度一般低于母材强度，钎焊接头强度有赖于增大钎焊面积。钎焊接头基本形式为搭接，板材零件搭接长度一般应不小于较薄零件厚度的 4 ~ 5 倍（软钎焊）、3 ~ 4 倍（硬钎焊）。一般应避免采用对接接头形式，必要时可采用斜对接形式，斜对接钎焊连接面积至

表 4.7-43　铝用硬钎剂组分及用途

牌　号	组分（质量分数）/%	钎焊温度/℃	用　途
211	KCl47，NaCl27，LiCl 14，$CdCl_2$4，$ZnCl_2$3，$AlF_3$5	> 550	火焰钎焊，炉中钎焊
	KCl51，LiCl41，$AlF_3$4.3，KF3.7	> 500	浸渍钎焊
YJ17	KCl44，LiCl34，NaCl12，KF - AlF_3 共晶（46%KF，54%AlF_3）10	> 560	浸渍钎焊
剂 201	KCl50，LiCl32，$ZnCl_2$28，NaF10	460 ~ 620	火焰钎焊，某些钎料炉中钎焊
剂 202	KCl28，LiCl42，$ZnCl_2$24，NaF6	450 ~ 620	火焰钎焊
H701	KCl 46，LiCl 12，NaCl26，KFAlF_3 共晶 10，$ZnCl_2$1.3，$CdCl_2$4.7	> 560	火焰钎焊，炉中钎焊
1712B	KCl 47，LiCl23.5，NaCl21，$AlF_3$3，$ZnCl_2$1.5，$CdCl_2$20，TiCl2①	> 500	火焰钎焊，炉中钎焊
KF - AlF_3	KF45.8，$AlF_3$54.2	> 558	炉中钎焊

① 铊 Ti 有剧毒



少应比钎焊件工作截面积大2~4倍。铝合金钎焊接头形式见图4.7-29。

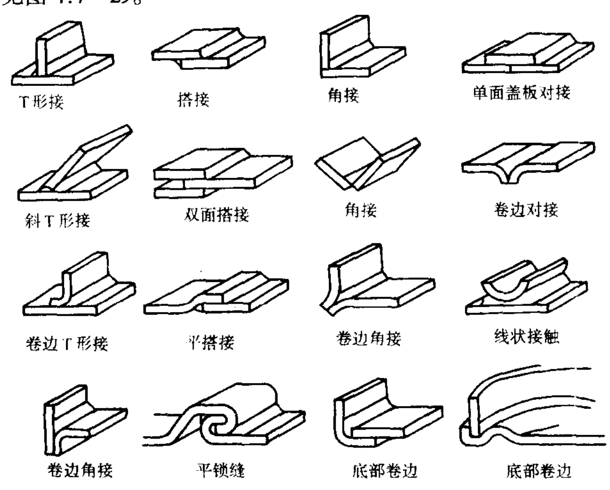


图4.7-29 铝合金焊接头设计

设计钎焊接头应考虑下列因素：

(a) 便于零件装配和自固紧。图4.7-30例举了零件装配和自紧固的多种方法。(b) 便于安置钎料，例如图4.7-31所示。(c) 封闭空间内便于钎焊时排出气体，例如图4.7-32的工艺性出气通道，否则，钎焊时受热空气膨胀，妨碍液态钎料填入，或使已填满间隙的钎料受压挤出，造成钎焊缺陷。(d) 留有适当大小的间隙。间隙的大小将直接影响钎缝致密性和接头强度。间隙过小，钎料难以流入接头间隙，造成钎缝夹渣或未钎透，降低接头强度；间隙过大，毛细作用减弱，钎料难以填满接头间隙，降低致密性和接头强度。

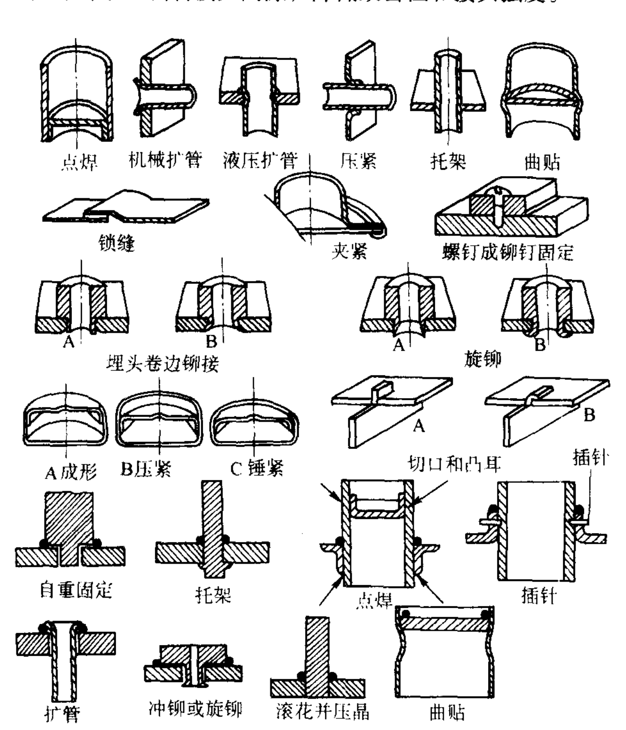


图4.7-30 零件装配及自紧固方法

选择接头间隙需考虑下列因素：

钎剂钎焊时，熔化的钎剂先流入接头间隙，接头间隙较小时，后进的熔化钎料可能将钎剂挤出间隙，接头间隙宜取稍大；无钎剂真空或气保护钎焊时，不存在上述过程，接头

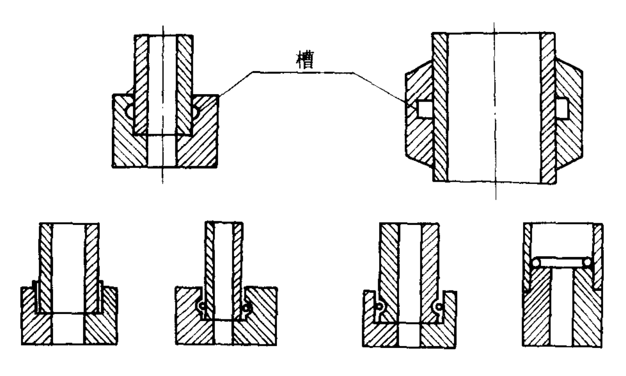


图4.7-31 在接头上安置钎料的方法

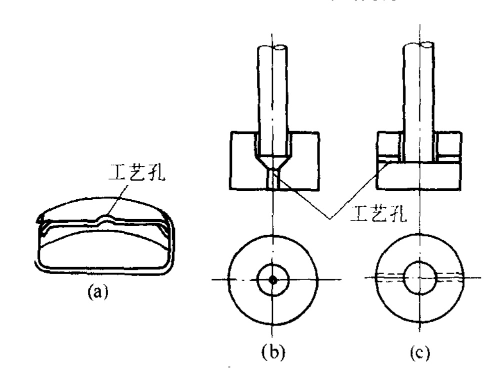


图4.7-32 封闭型接头的工艺孔

间隙可取稍小。搭接长度较大时，接头间隙宜选稍大，反之可取稍小。

铝及铝合金接头间隙一般为：有机钎剂软钎焊为0.15~0.40 mm；反应钎剂软钎焊为0.05~0.25 mm；硬钎焊为0.10~0.25 mm。

② 钎焊前零件表面清理 零组件必须先除油（包括涂料、脏物等）和氧化物，否则钎料不能润湿有脏物的铝及铝合金表面，无法填充接头间隙。有时，为了改善铝及铝合金钎焊性或提高接头耐蚀性，钎焊前在零件表面涂覆金属层。

铝及铝合金表面去除氧化膜可采用机械方法和化学方法。机械清理限于用钢棉、锉刀、刮刀、不锈钢丝刷等，禁用砂纸、喷砂。化学方法包括酸洗或碱洗，前者用于薄氧化膜，后者用于厚氧化膜。

氧化膜较厚时，应先用机械方法局部清除氧化膜，再用5%的NaOH（质量分数）溶液清洗，温度保持60℃左右，碱洗时间最好控制在10~15 s以内，为防止浸蚀过度，应严格控制溶液温度和浸蚀时间。碱洗后用冷水或热水冲净碱液，然后用稀硝酸或铬酸（CrO_3水溶液加重铬酸钾）中和残余碱液，实现组件表面光亮化，再用冷水或热水冲洗，最后用热空气吹干。

完善的无钎剂真空钎焊技术已无需化学清理，但需用钢棉、锉刀、电动旋转不锈钢丝刷等工具清理铝及铝合金组件表面，使表面粗糙化，增强真空毛细作用。

零件清洗后，尽早进行钎焊，最迟不超过48 h。

③ 火焰钎焊 适用于手工和自动化生产，设备简单，使用方便，但操作技术难度大，由于铝及铝合金加热时无颜色变化，熔化时颜色变化大，手工火焰钎焊难以精确检测控制加热温度。可采用氧-乙炔、氢-氧、氧-天然气、汽油-压缩空气火焰。火焰钎焊工艺参数见表4.7-44。

④ 浸渍钎焊 将预置钎料后的整个装配件沉浸在熔融的钎剂槽液内，由于钎剂的比热低，沉浸前应将装配件预热到大约538℃。浸渍钎焊适于连续大批量生产方式，能源消耗大，环境污染严重，清除残余钎剂工序复杂，单件断续生产经济效益低。浸渍钎焊曾作为复杂结构铝合金热交换器的



传统生产方法，生产效率高，钎焊质量好。为克服浸渍钎焊缺点，近代铝合金热交换器浸渍钎焊已部分为无钎剂真空钎焊或无腐蚀性钎剂气保护钎焊取代。

表 4.7-44　铝合金氧－乙炔和氢－氧火焰钎焊工艺参数

材料厚度 /mm	氧－乙炔火焰钎焊			氢－氧焰钎焊		
	喷嘴孔径 /mm	氧气压力 /kPa	乙炔压力 /kPa	喷嘴孔径 /mm	氧气压力 /kPa	氢气压力 /kPa
0.5	0.64	3.5	7	0.90	3.5	7
0.6	0.64	3.5	7	1.14	3.5	7
0.8	0.90	3.5	7	1.40	3.5	7
1.0	0.90	3.5	7	1.65	7.0	14
1.3	1.14	7.0	14	1.90	7.0	14
1.6	1.40	7.0	14	2.20	7.0	14
2.0	1.65	10.5	21	2.40	10.5	21
2.6	1.91	10.5	21	2.70	10.5	21
3.2	2.16	14.0	28	2.92	10.5	21

⑤ 空气炉中钎焊　空气炉中钎焊技术难度较小，生产效率较高，钎焊变形较小的钎焊方法。连续加热炉内大批量钎焊生产电冰箱蒸发器，生产效率可达每小时 500 件。钎焊设备分为电加热炉和燃气加热炉。缺点为需采用钎剂，钎剂将浸蚀炉衬及炉壁，需随后进行繁琐的清洗工序。不管采用何种加热炉，炉膛内必须设有均温区。钎焊非热处理强化铝合金时，均温差不应超过 ±5℃，用 Al－Si 钎料炉中钎焊热处理强化 Al－Si－Mg 系铝合金时，温差应不超过 ±2℃。入炉钎焊前，可用浸沾法、刷涂法或喷涂法向接头施加钎剂浆，稀释剂可用自来水、蒸馏水或去离子水，自来水内不应含重金属，重金属能引起铝及铝合金件腐蚀。也可用乙醇作为载体，但涂钎剂后的铝及铝合金件应先烘干，然后入炉钎焊。

⑥ 无腐蚀性钎剂钎焊　利用 $KF-AlF_3$ 无腐蚀性钎剂进行钎焊，钎焊后无需清除残余钎剂的新技术。钎剂具有很强的活性，能有效地去除母材和钎料表面氧化膜，钎剂残渣不吸潮，对铝及铝合金无腐蚀性，不必清除残渣。钎剂在大气中熔化后很快丧失活性，钎焊时必须快速加热。最好用氮气保护炉中钎焊，钎料的润湿作用显著改善，只需涂少量钎剂。

实例　铝合金翅片式散热机箱气体保护钎焊

有一种 3A21（LF21）铝合金翅片式散热机箱，外形尺寸为 400 mm × 200 mm × 220 mm，如图 4.7-33 所示，其结构和零件装配如图 4.7-34 所示。

机箱零件厚度：两内侧板 5～8 mm，翅片 0.2 mm，前后面板 6～10 mm。机箱共有 380 mm 长的钎缝 4 条，360 mm 长的钎缝 160 条，钎缝总长为 59 120 mm。设计要求各面直线度和平面度均小于 0.5 mm。

零件装配前，洗净零件及钎料片，用蒸馏水将钎剂调成糊状。装配时，采用不锈钢制 U 形压条及 C 形夹定位及固定两侧面各零件（侧板、翅片、面板），再用长螺杆和 U 形压条将各件组装成为一体，如图 4.7-35 所示。

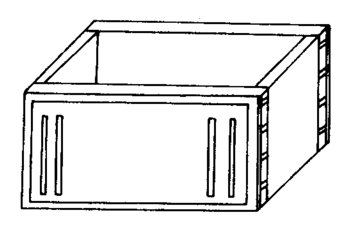
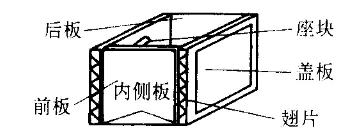


图 4.7-33　机箱外貌



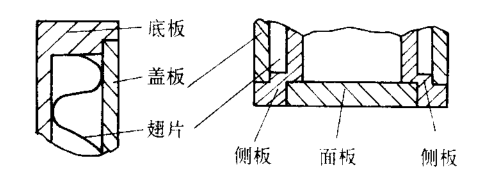


图 4.7-34　机箱结构及零件

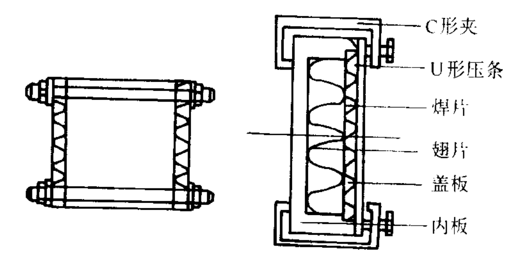


图 4.7-35　机箱焊前装配示意图及侧板装配图

组装时，按图样检查各部位尺寸，满足要求后，氩弧焊定位（16 个定位点），撤除长 U 形条及双头螺杆，但仍保持两侧零件的夹具。

在组装过程中，将糊状钎剂涂于钎料片上，放入 250℃ 烘箱中烘干，以除去钎剂中水分，然后将各钎料片分别插入各钎焊部位，装配间隙保持为 0.03～0.06 mm，不可过大或过小，否则会使钎焊处无钎料填充或产生未钎透。

钎焊时，采用 HLAlSi11.7 或 HLAlSi－11.7SrLa 及 QF 型无腐蚀性氟化物钎剂（共晶温度 560℃），以纯氩或氮气作为保护气体。炉中钎焊时钎焊温度为 640℃，钎焊持续时间为 15 min。通过观察窗连续监视炉内钎剂和钎料熔化的动态过程，适当调整保护气体流量和钎焊过程持续时间。

为保持钎焊件均匀加热条件，并发挥镁蒸气作用效果，炉中钎焊时在钎焊件上设置了保护罩，保护罩结构如图 4.7-36 所示。

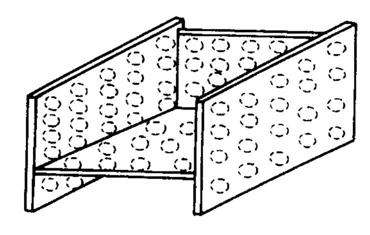


图 4.7-36　保护罩结构示意图

采用上述技术，机箱产品钎焊质量及尺寸精度均满足设计要求。

⑦ 真空钎焊　真空钎焊的优点是不采用钎剂，可消除使用钎剂引起的麻烦（钎缝内钎剂夹杂、钎剂清除、钎剂配制、涂装、烘干等），允许在组件上设计盲腔、曲折通道和细小孔道，由于整体真空加热，钎焊件变形小，有利于制成精密器件，如尺寸精度极高的波导器件等。真空钎焊的缺点是设备投资大，加热—钎焊—冷却过程时间长，效率低。即使真空度极高，铝及铝合金表面氧化膜也难以清除干净，与钎剂钎焊法比较，液态钎料在热态铝及铝合金表面润湿能力和接头间隙毛细作用较弱，需工艺技术措施。否则钎焊质量难以确保。工艺措施为钎焊前对铝及铝合金钎焊表面进行粗糙化处理、选用较小装配间隙、在间隙内或邻近间隙处预置钎料并通过自固紧方法或装配夹具或定位焊方法把钎料定



位、采用含镁的Al-Si-Mg或Al-Si-Mg-Bi钎料、采用内置镁块、能包容待钎焊组件的工艺罩，在工艺罩空间内局部增大镁蒸气浓度。作为金属活化剂，镁蒸气可去除钎焊区空间中的水和氧，防止铝及铝合金氧化，使铝及铝合金表面氧化物变质，使熔态钎料能透过氧化物在铝及铝合金表面上铺展，将氧化物抬起，完成钎焊过程。

实例 计算机铝合金机箱真空钎焊

在恶劣环境下工作的计算机需配备加固的铝合金机箱，如图4.7-37所示。机箱最大外形尺寸为495 mm×186 mm×260 mm，材料为3A21铝合金，由11个厚度不一（波纹散热片厚度0.1~0.2 mm，前面板框架厚度14 mm）的零件组装钎焊而成。它的技术要求严格，框架平行度及垂直度不得大于0.3 mm，不得发生虚焊或脱焊，零件的非钎焊部位不得留有钎料或钎剂残留的痕迹。

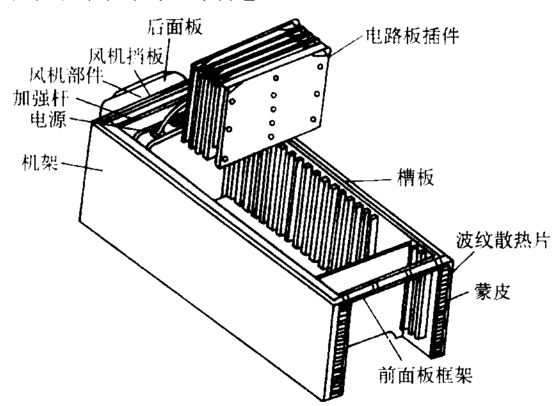


图4.7-37 3/4和1/2全加固计算机机箱

根据上述条件，决定采用真空钎焊工艺如下。

钎料为Al-10Si-1.5Mg，片材，厚度0.1 mm。

金属吸气剂为镁（Mg），块状。

组装钎焊夹具为自制的不锈钢变厚度框架式结构。

测温度器件为镍铬-镍铝热电偶，在前后面板零件上各插入一个热电偶。

钎焊工艺参数视不同机箱的几何尺寸而定。工艺参数选用范围：钎焊温度595~605℃，钎焊持续时间4 min，真空度$1.33\times10^{-2}-6.65\times10^{-3}$ Pa。

钎焊后，机箱各条钎缝均匀饱满，焊角过渡圆滑，表面光洁、平整、几何尺寸满足设计要求，用标准的电路板可自由插入机箱各槽内，无松动感，机箱使用效果良好。

（4）清除钎剂残渣

铝及铝合金组件钎焊后残留在接头上的钎剂残渣会引起组件腐蚀，彻底清残留钎剂是钎焊生产的一个重要组成部分。清除方法有：

1）在60~80℃热水中浸泡10 min，用毛刷仔细清洗钎缝上的残渣，冷水冲洗，HNO_3 15%（质量分数）水溶液中浸泡约30 min，再用冷水冲洗。

2）60~80℃流动热水冲洗10~15 min，放在65~75℃，CrO_3 2%，H_3PO_4 5%水溶液中浸泡5 min，再用冷水冲洗，热水煮，冷水浸泡8 h。

3）60~80℃流动热水冲洗10~15 min，流动冷水冲洗30 min。放在草酸2%~4%，NaF1%~7%，海鸥牌洗涤剂0.05%溶液中浸泡5~10 min，再用流动冷水冲洗20 min，然后放在HNO_3 10%~15%硝酸溶液中浸泡5~10 min，取出后再用冷水冲洗。

氟化物组成的无腐蚀性钎剂，将工件放在7%草酸，7%硝酸组成的水溶液中，先用刷子刷洗钎缝，再浸泡1.5 h，后用冷水冲洗。

对于LF21合金，钎焊后必须在零件尚未冷却（一般在100~150℃）的条件下进行冲洗，冲洗时间需在4 h以上。清洗工艺流程为：钎焊后热水冲洗（70℃以上的流动热水）→混合酸洗（1体积硫酸+1体积硝酸室温下5~10 min）→冷水清洗→硼酸浸洗（硼酸30 g/l+柠檬酸40 g/l在80~90℃下浸洗10~15 min）→冷水清洗→阴极电解清洗（硫酸200 g/L，电压10 V，阳极板：石墨板，阴极电解清洗电流密度DK：0.5~0.8 A/dm^2，室温下5~10 min）→冷水清洗→10%硝酸浸洗→冷水清洗→铬酸浸洗（铬酸150~180 g/L+硫酸30~50 g/L，室温下5~10 min）→冷水清洗→混合酸洗→冷水清洗→去离子水超声波清洗→烘干。

铝及铝合金软钎剂残渣可用有机钎剂清除。

如果铝件不需要或不可能清洗全氟铝钎剂残渣，则可不进行清除残渣的工序。

1.4 铝及铝合金的固相焊接

铝及铝合金的固相焊接包钎搅拌摩擦焊、摩擦塞补焊和扩散焊等。

1.4.1 搅拌摩擦焊

1991年英国焊接研究所发明了搅拌摩擦焊。该方法适合于焊接铝及铝合金。焊接的实质是固相连接，可焊接其他方法不能焊接的材料，接头力学性能优异。搅拌摩擦焊的优点是：无焊接裂纹、无焊缝气孔、焊接变形小、无焊接烟尘、无飞溅、可全位置焊接、能源效率高、不填丝、不气保护、操作者无焊接技能要求、适于多种接头形式、适于自动化。搅拌摩擦焊的缺点是：焊接速度比熔焊速度低、工件要刚性夹紧、焊接压力较大、需要背面垫板。

（1）搅拌摩擦焊原理

搅拌摩擦焊使用高强材料制作的搅拌头，在焊接过程中认为是不磨损的，从肩台上延伸出来，夹持器带动搅拌头高速旋转，使搅拌头钻入被焊件接缝，被焊件被紧紧地夹持在工作台上，搅拌头的插入长度比被焊件厚度稍小，搅拌头的肩台和被焊件表面紧密接触，搅拌头沿焊接方向移动，被焊件在力和摩擦热的作用下产生热塑性变形区，在摩擦搅拌力的作用下热塑性变形区向接头后侧流动，经过原子扩散、动态再结晶形成焊缝。为获得优良焊缝，必须优化搅拌头旋转速度、焊接速度、锻压力和搅拌头形状。

搅拌摩擦焊原理图见图4.7-38

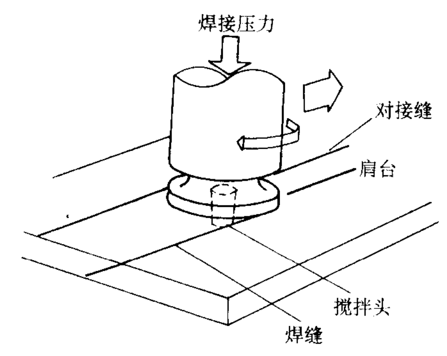


图4.7-38 搅拌摩擦焊原理图

（2）铝及铝合金搅拌摩擦焊焊接性

适合于搅拌摩擦焊的铝合金有：2000系（Al-Cu）、5000系（Al-Mg）、6000系（Al-Mg-Si）、7000系（Al-Zn）、8000系（Al-Li）。

铝及铝合金搅拌摩擦焊易出现的焊接缺陷有根部未焊透、空洞和黑线。

1）根部未焊透 当搅拌头长度和被焊件厚度匹配不良，背面垫板平面度较差，被焊件厚度公差超差时易产生未焊透。



2）空洞 焊接参数匹配不良时易产生空洞，空洞形状不规则。

3）黑线 在金相组织上呈不规则的黑线特征，本质为连续的氧化膜夹杂。

（3）焊接工艺

1）接头设计 铝及铝合金搅拌摩擦焊适合于对接、搭接、T形接头、角接等接头形式，焊接位置适合于水平焊接、立焊、仰焊、空间焊缝。焊缝形状适合于直线焊缝、圆焊缝、环焊缝、曲线焊缝、三维焊缝。常见接头形式见图4.7-39。

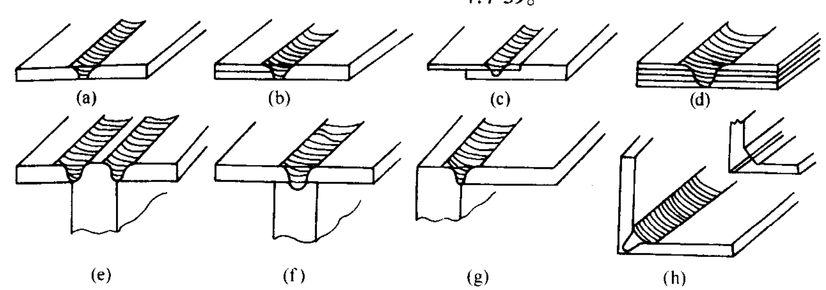


图4.7-39 铝及铝合金搅拌摩擦焊接头设计

2）搅拌头形状 铝及铝合金搅拌摩擦焊搅拌头的形状见图4.7-40。

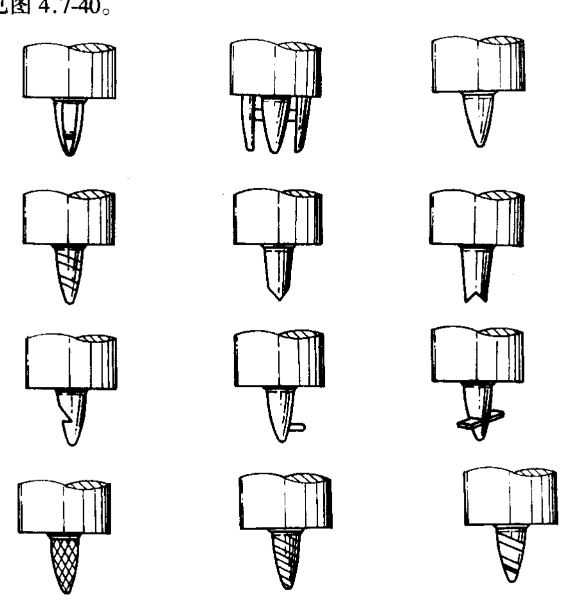


图4.7-40 搅拌头的形状

新型搅拌头可从台肩内伸缩，受计算机控制，可保证全过程焊透，焊接结束无指孔，适合于环缝焊接。

3）焊接参数 以2024铝合金为例说明焊接参数对焊接质量的影响。

① 搅拌头旋转速度 当搅拌头旋转速度过低时，焊接区出现明显的孔形通道；当搅拌头旋转速度提高到一定值时，孔形通道消失，但焊缝组织疏松，强度较低；当搅拌头旋转速度达到1 000 r/min时，焊缝致密，接头强度最高。接头强度系数可达0.74。

② 焊接速度 当搅拌头旋转速度为1 000 r/min时，焊接速度较低时，焊缝近缝区出现过热组织；当焊接速度较高时，不能形成完好的焊缝，存在孔洞或组织疏松。焊接速度为30 mm/min时，接头质量最好。

③ 轴向焊接压力 当搅拌头肩台作用于被焊件的轴向焊接压力较小时，热塑性金属向上挤出，焊缝底部得不到金属补充而形成孔洞或疏松组织；当轴向焊接压力较大时，肩台接触的被焊件表层金属发生强烈热塑变形，沿肩台边沿溢出，形成焊缝表面凹进和两侧飞边毛刺。

肩台直径$2r_s$、焊接速度v、轴向焊接压力F、被焊材料厚度W各参数之间的配合如下：

① F和v之间存在最佳关系，取决于被焊材料的性质和肩台几何形状；

② 搅拌头直径减小可增加焊接速度v，有利于提高接头质量；

③ W和r_s有下列关系：

$$5\frac{W}{2} \geq r_s \geq \frac{W}{2}$$

（4）组织和性能

1）铝及铝合金搅拌摩擦焊接头构成 铝及铝合金搅拌摩擦焊接头分为4个区：A母材；B热影响区（HAZ）；C热力影响区（TMAZ）；D焊核区。见图4.7-41。

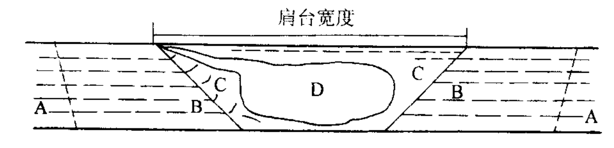


图4.7-41 铝及铝合金搅拌摩擦焊接头组成

A母材：远离焊缝，未发生塑性变形，虽经历焊接热循环，但组织结构和力学性能未受影响。

B热影响区：离焊缝较近，未发生塑性变形，经历焊接热循环，组织结构和力学性能发生变化。

C热力影响区：在较高的温度下发生塑性变形，未发生再结晶，经历焊接热循环，组织结构和力学性能发生变化。和焊核区存在明显界限。

D焊核区：发生再结晶。

2）典型铝合金搅拌摩擦焊接头组织

① 2×××系合金 2024合金，厚度6.5 mm，搅拌头旋转速度650 r/min，焊接速度1 mm/s，焊接温度分别为30℃和-30℃。-30℃下焊接时，焊核区最高温度不超过140℃，全部为细小等轴晶，尺寸为0.8 μm。30℃下焊接时，焊核区最高温度达到330℃，细小等轴晶，尺寸约为10 μm。

② 6×××系合金 6×××系合金中6013合金，状态为T6和T4，厚度4 mm，搅拌头旋转速度1 400 rpm，焊接速度400 mm/min（T6）和450 mm/min（T4）。由于台肩和工件上表面接触，焊缝形状为V形。母材为长条形轧制晶粒，晶粒度d_{max} = 62 μm，d_{min} = 20 μm；热影响区的d_{max} = 57 μm，d_{min} = 17 μm；焊接区为等轴晶，晶粒度为10～15 μm；在搅拌摩擦焊中，由于温度和变形的作用产生了动态再结晶，变形持续到动态再结晶发生，晶粒内形成亚晶界。热影响区虽然晶粒尺寸较大，也存在亚晶界。

6063-T5，厚度4 mm，搅拌头旋转速度800～3 600 r/min，当旋转速度低于800 r/min，接头易出现缺陷，焊接速度6 mm/s。焊核区晶粒度随搅拌头旋转速度的增加而增加，当焊接速度分别为800、1 220、和2 450 r/min时，搅拌区晶粒度相



应为5.88 μm、9.21 μm、17.75 μm。搅拌头旋转速度的增加使搅拌区最高温度增加，从而使再结晶晶粒尺寸增加。

6061-T6合金，厚度6.3 mm，焊接参数：搅拌头旋转速度300~1 000 r/min，焊接速度0.15~0.25 cm/s，搅拌头的直径6.3 mm，长5.8 mm，肩台直径12.5 mm。焊核区发生动态再结晶，晶粒尺寸平均为10 μm，母材晶粒尺寸为100 μm。

6061铝合金厚度12.7 mm，采用搅拌头旋转速度416 r/min、焊接速度133 mm/min的焊接参数焊接时，焊核区的显微组织很复杂，和各处的塑性流变及受热不同有关。由于肩台和工件间的接触，在接头上部发生严重变形。搅拌作用完全消除了结合线的痕迹。在焊接过程中材料从搅拌头的前沿转移到后面，结合处上部材料被搅拌头强力送入接头，结合处下部材料被移到上表面，材料可能围绕搅拌头上下移动数次。接头底部的材料流变较小。

焊核区的晶粒细小，有沉淀相分布在晶界上。焊核区为细小等轴晶，说明此区发生了回复或再结晶。焊核区的温度达到450~500℃，热力影响区的温度达到350~450℃，热力影响区有明显的沉淀相和晶粒粗化，热影响区晶粒严重粗化。

虽然焊缝是完美的，在焊核区的机械混合远不完全。焊缝的纵截面为层状组织，上层是由水平的沿台肩表面从搅拌头后沿上部延伸的条纹状材料组成。

③ 7xxx合金　7075-T7451合金厚度6.35 mm，搅拌头旋转速度6.6 r/s，焊接速度1.7 mm/s。焊核区发生再结晶，晶粒度1~5 μm，强化相发生溶解；焊接热影响区晶粒度和母材晶粒度一样。

7075-T6，厚度6.35 mm。焊缝质量良好，焊核区无熔化现象，发生再结晶，晶粒尺寸为2~4 μm，位错密度较低，焊接时强化相发生固溶，冷却时再次沉淀。

④ 异种组合　6061+2024合金厚度12.7 mm，采用搅拌头旋转速度637 r/min、焊接速度133 mm/min的焊接参数焊接时，焊核区分为三区：机械混合区，特征是两种材料的弥散分布的颗粒；搅拌引发的塑性流变区，特征是两种合金交替分布的旋涡层状组织；未混合区，特征是6061合金的细小等轴晶。在2024合金一侧，在热力影响区内，上部变形晶粒垂直于热力影响区的焊核的界限，下部变形晶粒平行于热力影响区和焊核的界限，在焊核根部2024合金发生严重塑性变形。

在接头根部2024合金发生严重塑性变形，但两种材料未发生混合。

焊核区宽度和形状和焊接参数有关。搅拌头旋转速度越快，材料的机械混合越均匀。

3）铝及铝合金搅拌摩擦焊接头性能　表4.7-45列出了部分铝及铝合金搅拌摩擦焊接头性能

表4.7-45　铝及铝合金搅拌摩擦焊接头性能

材料	厚度/mm	焊接速度/mm·min⁻¹	旋转速度/r·min⁻¹	接头强度系数	延伸率	备注
7075-T651	6.35	127	—	0.84	15%	
7075-T651	6.35	127	—	0.80	3.5%	焊后时效
7075-T7451	6.35	102	396	0.77	6	①
6013-T4	4	450	1 400	0.94	8.7	
6013-T6	4	400	1 400	0.75	4.5	
6063-T5	4	600	—	0.71	10	
6063-T5	4	600	—	1.0	19	焊后淬火+时效②
2195	8	—	—	405 MPa	10.4	熔焊324 MPa

① 在 $R=0.3$ 时，疲劳裂纹门槛值母材的为1.83 $MPam^{1/2}$，焊核的为1.04 $MPam^{1/2}$，热影响区地为3.24 $MPam^{1/2}$。

② 淬火+时效规范为530℃×1 h淬火+175℃×12 h。

1.4.2　摩擦塞补焊

铝及铝合金焊接生产补焊是不可避免的，现在补焊一般采用手工氩弧焊。但手工氩弧补焊会带来下列不利影响：①补焊处金属力学性能下降；②补焊处金属组织恶化；③补焊处变形大，残余应力较大，导致构件变形；④补焊处若产生新的缺陷，需再次补焊，如此反复，会导致构件报废。摩擦塞补焊是一种固态补焊方法，不会因为材料的焊接性差而产生裂纹、气孔等焊接缺陷，不需对缺陷在材料厚度方向上进行定位，补焊处的金属性能和组织不会恶化，补焊处的变形和残余应力较小，是铝及铝合金补焊较为理想的方法。

1）摩擦塞补焊原理　在被补焊的缺陷处加工一个锥型通孔，将所有缺陷排除，用一个具有相似锥形的棒塞入锥型通孔内，用摩擦焊的方法将塞棒和构件焊接在一起，加工去除多余部分，焊接完毕。

摩擦塞补焊焊接参数有：旋转速度、顶锻力、锥角、顶锻量、塞棒直径。

2）焊接接头金相组织　图4.7-42为塞焊接头宏观照片，为典型的固态连接。从结合面向塞棒一边有5~10mm的受热区，棒材失去纤维方向特征。被补焊件一边也存在受热区。棒材和被补焊件交界处表面有挤出物，形成双飞边。

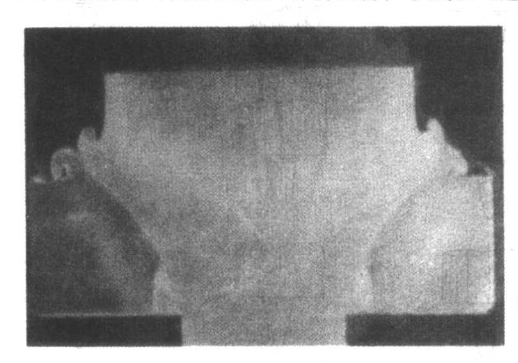


图4.7-42　塞焊接头宏观照片

图4.7-43为塞补焊接头结合部微观金相照片。图中从左上角至右下角深色宽度为8~12 mm的区域为结合区，结合区实际宽度为0.04~0.06 mm。结合区的组织细小，结合区两侧附近的组织也较细小，结合区被补焊件一边的晶粒沿接合面方向被拉长，在塞补焊过程中被补焊件受挤压形成的结合区组织正常。完全克服了熔化焊的缺陷。

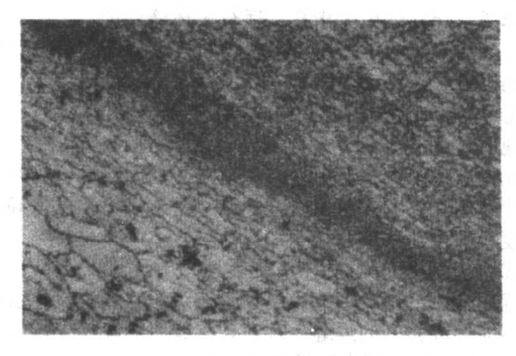


图4.7-43　塞焊接头结合部金相照片（×200）

1.5　铝及铝合金的电阻焊

1）点（缝）焊特点　铝及铝合金具有良好的导电性和导热性，点（缝）焊时需要强大的脉冲电流。

铝及铝合金表面易氧化，焊件间的接触电阻大，当通过大的脉冲电流时，易产生飞溅。

断电后熔核开始冷却，由于热导率及线膨胀系数大，熔核



收缩快，易引起缩孔及焊接裂纹等缺陷。

点（缝）焊不同厚度或不同型号铝及铝合金时，由于电阻发热量互有差异，熔核相对于连接界面发生偏移，造成熔核直径及焊点（焊缝）强度减小。

2）点（缝）焊焊接性　根据材料电阻率及高温屈服点的不同，通常将材料分为A、B两种类型。A类材料包括5A06、2A12－T4、4A04－T6，电阻率及高温屈服点较高，焊接性较差，焊接时易产生飞溅或裂纹。B类材料包括5A03－O、3A21－O、2A12－O、7A04－O，电阻率及高温屈服点较低，焊接性较好。

LY12铝合金点焊时易出现"胡须"。"胡须"形似裂纹，但不是焊接缺陷。胡须是不连续的空间锥台面结构，胡须中部Cu、Mg含量较高。胡须是点焊过程中不均匀塑性变形引起的，胡须数量和形态随点焊过程中焊接压力大小和加压时间的先后不同而不同。

3）点（缝）焊材料　点（缝）焊材料是指点焊时的电极和缝焊时的轮盘（也是电极），铝及铝合金点（缝）焊时一般采用纯铜Cu－ETP，它含Cu99.9%及微量Ag，有时也用镉铜CuCd1，它含Cd0.7%～1.3%，余量为Cu。

4）点（缝）焊零件表面制备　零件的表面状态直接影响表面接触电阻的大小和电流场的分布，对发热与散热有重大影响，其结果将影响电极的使用寿命，成品焊件的表面质量、熔核的尺寸与形状及焊点（焊缝）强度的稳定性。

当零件表面有油污、水分、油漆、氧化膜及其他脏物时，表面接触电阻将急剧增大并在很大范围内波动，直接影响到焊接质量的稳定性。

为此，要求零件表面具有小而均匀的接触电阻，严禁表面存在脏物及氧化膜。

铝及铝合金零件表面清理多为化学法。通常先用有机溶剂（汽油或除油剂）除油，然后用温水冲洗干净。若需去除表面氧化膜则需在除油后在碱性溶液内进行表面清洗。

铝及铝合金零件表面也可用机械方法清理，如用电动或风动不锈钢钢丝刷清理其表面。

必要时，可在专用装置上测量两电极夹紧零件状态下的总电阻，以直观地验证零件表面清理的质量。

5）点焊工艺　铝及铝合金点焊设备有单相交流点焊机，直流脉冲点焊机，三相低频点焊机，二次整流点焊机。单相交流点焊机设备投资小，但焊机的使用性能差，仅限用于不重要的焊件。

点焊时通电及加压的方式非常重要，点焊铝及铝合金时，有台阶形及马鞍形两种加压方式可供选用，如图4.7-44、图4.7-45所示。

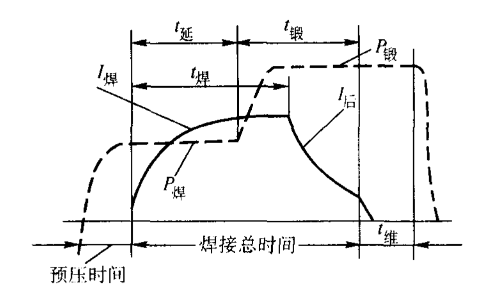


图4.7-44　台阶形加压方式

$I_{焊}$—焊接电流；$I_{后}$—后热电流；
$P_{焊}$—焊接压力；$P_{锻}$—锻压压力；
$t_{焊}$—焊接通电时间；$t_{延}$—锻压延时时间；
$t_{锻}$—锻压时间；$t_{维}$—锻压维持时间

加压方式及相应焊接工艺参数根据铝及铝合金的种类、型号及其零件厚度确定。图4.7-44、图4.7-45表示了焊接电流波形与其加压曲线的匹配关系，马鞍形加压方式有利于防止热处理强化铝合金熔核内产生缩孔、裂纹等缺陷。

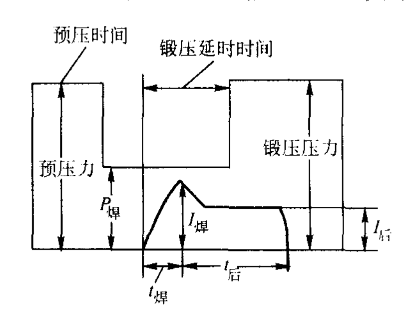


图4.7-45　马鞍形加压方式

$I_{焊}$—焊接电流；$I_{后}$—后热电流；$t_{焊}$—焊接通电时间；
$t_{后}$—后热通电时间；$P_{焊}$—焊接压力

点焊质量要求不高的工业纯铝、铝－锰合金、铝－镁合金零件时，通常采用普通交流点焊机施焊，焊接工艺参数见表4.7-46。

表4.7-46　铝及铝合金单相交流点焊工艺参数

焊接厚度/mm	电极直径/mm	球面电极半径/mm	电极压力/N	焊接电流/kA	通电时间/s	焊点核心直径/mm
0.4+0.4	16	75	1 470～1 764	15～17	0.06	2.8
0.5+0.5	16	75	1 764～2 254	16～20	0.06～0.10	3.2
0.7+0.7	16	75	1 960～2 450	20～25	0.08～0.10	3.6
0.8+0.8	16	100	2 254～2 842	20～25	0.10～0.12	4.0
0.9+0.9	16	100	2 646～2 940	22～25	0.12～0.14	4.3
1.0+1.0	16	100	2 646～3 724	22～26	0.12～0.16	4.6
1.2+1.2	16	100	2 744～3 920	24～30	0.14～0.16	5.3
1.5+1.5	16	150	3 920～4 900	27～32	0.14～0.16	6.0
1.6+1.6	16	150	3 920～5 390	32～40	0.18～0.20	6.4
1.8+1.8	22	200	4 018～6 860	36～42	0.20～0.22	7.0
2.0+2.0	22	200	4 900～6860	38～46	0.20～0.22	7.6
2.3+2.3	22	200	5 390～7 644	42～50	0.20～0.22	8.4
2.5+2.5	22	200	4 900～7 840	56～60	0.20～0.24	9.0

重要的焊件应采用直流脉冲点焊机或其他新型点焊机施行点焊。

点焊硬铝等热处理强化类高强度铝合金时，焊接热影响可使焊点周围母材的性能发生变化。例如，当加热温度超过150～200℃时，热影响区发生软化，硬度显著降低，近焊点母材晶界上低熔点共晶体部分熔化，在焊件收缩应力作用下



可能产生裂纹。为避免发生这种现象，必须采用直流脉冲点焊机并选用大电流，高电极压力，并尽可能缩短加热时间。

在直流脉冲点焊机上点焊铝合金时的焊接工艺参数见表 4.7-47。

表 4.7-47　在直流脉冲点焊机上点焊铝合金时的工艺参数

铝合金牌号	焊件厚度/mm	球面电极半径/mm	电极加压方式	焊接压力/N	锻压压力/N	锻压开始时间/s	焊接电流/kA	通电焊接时间/s	焊点核心直径/mm
3A21 5A03 5A05	0.8+0.8	75	恒定不变的压力	1 960 ~ 2 450	—	—	25 ~ 28	0.04 ~ 0.08	—
	1.0+1.0	100		2 450 ~ 3 528	—	—	29 ~ 32	0.04	—
	1.5+1.5	150		3 430 ~ 3 920	—	—	35 ~ 40	0.06	—
	2.0+2.0	200		4 410 ~ 4 900	—	—	45 ~ 50	0.10	—
	2.5+2.5	200		5 650 ~ 6 370	—	—	49 ~ 55	0.10 ~ 0.14	—
	3.0+3.0	200	台阶形变化的压力	7 840	21 560		57 ~ 60	0.12 ~ 0.18	—
2A12 TA04 – T6	0.5+0.5	75		2 254 ~ 3 038	2 940 ~ 3 136	—	19 ~ 26	0.02	3.0 ~ 3.2
	0.8+0.8	100		3 136 ~ 3 430	4 900 ~ 7 840	0.06	26 ~ 36	0.04	4.0
	1.0+1.0	100		3 528 ~ 3 920	7 840 ~ 8 820	0.06	29 ~ 36	0.04	4.5
	1.3+1.3	100		3 920 ~ 4 116	9 800 ~ 10 290	0.06	40 ~ 46	0.04	5.3
	1.6+1.6	150		4 900 ~ 5 782	13 230 ~ 13 720	0.08	41 ~ 54	0.06	6.4
	1.8+1.8	200		6 664 ~ 7 154	14 700 ~ 15 680	0.08	45 ~ 50	0.06	7.0

6）缝焊工艺　铝及铝合金缝焊工艺与点焊工艺基本相近，工艺参数选择原则是尽可能采用硬规范，但缝焊时的焊接电流比点焊时大 20% ~ 30%，通电时间减小 30% ~ 50%，电极压力增大 10% ~ 25%。

非热处理强化铝合金在普通单相交流缝焊机上缝焊工艺参数参见表 4.7-48，重要的铝合金焊件必须采用直流脉冲缝焊机施焊。在步进式直流脉冲缝焊机上缝焊铝合金的工艺参数见表 4.7-49。

表 4.7-48　在单相交流缝焊机上缝焊铝合金的工艺参数

焊件厚度/mm	滚盘边沿球面半径/mm	送进量（点距）/mm	3A21、5A03、5A06				2A12 – T4、7A04 – T6			
			焊接电流/kA	脉冲持续时间/s	滚盘压力/N	每分钟脉冲数	焊接电流/kA	脉冲持续时间/s	滚盘压力/N	每分钟脉冲数
1.0+1.0	100	2.5	49.6	0.06	3 430	120 ~ 150	48	0.08	5 390	120 ~ 150
1.5+1.5	100	2.5	49.6	0.10	4 116	120 ~ 150	48	0.12	8 330	100 ~ 120
2.0+2.0	150	3.8	51.4	0.12	5 390	100 ~ 120	51.4	0.12	8 820	80 ~ 100
3.0+3.0	150	4.2	60.6	0.16	6 860	60 ~ 80	51.4	0.14	9 800	60 ~ 80
3.5+3.5	150	4.2	—	—	—	—	51.4	0.16	9 800	60 ~ 80

表 4.7-49　在步进式直流缝焊机上缝焊铝合金的工艺参数

焊件厚度/mm	滚盘宽度/mm	电极压力/N	焊接直流/kA	焊接通电时间/s	焊接速度/m·min⁻¹	焊缝宽度/mm
0.4+0.4	6	2 058 ~ 2 254	20 ~ 22	0.02	1.25	2.3
0.5+0.5	6	2 352 ~ 2 940	20 ~ 24	0.02 ~ 0.04	1.0	2.5
0.8+0.8	6	2 450 ~ 3 038	25 ~ 30	0.02 ~ 0.04	1.0	3.3
1.0+1.0	8	3 332 ~ 3 430	30 ~ 33	0.04 ~ 0.06	0.9	3.5
1.2+1.2	8	3 720 ~ 3920	33 ~ 36	0.06 ~ 0.08	0.8	4.1
1.5+1.5	10	3 920 ~ 4 410	38 ~ 40	0.06 ~ 0.08	0.8	4.8
2.0+2.0	12	4 418 ~ 4 802	41 ~ 45	0.08 ~ 0.01	0.65	5.5 ~ 5.6
2.5+2.5	12	4 410 ~ 5 880	45 ~ 55	0.12 ~ 0.14	0.6	6.5 ~ 6.6

2　镁及镁合金的焊接

2.1　镁及镁合金概述

镁比铝轻，纯镁强度低，很少用作工程材料，常以合金形式使用。镁合金比强度、比刚度、抗振能力较高，切削加工、铸造和锻压性能良好，在航天、航空、汽车、光学仪器、无线电技术等工业部门获得较多应用。

2.1.1　镁及镁合金的物理性能

镁及镁合金的物理性能见表 4.7-50 和表 4.7-51。



表 4.7-50　镁的主要物理性能数据

密度 ρ/g·cm^{-3}	熔化温度 T_M/℃	线胀系数 a (0～100℃) /10^{-6}K^{-1}	热导率 λ/W·(cm·K)$^{-1}$	比热容 c/J·(g·K)$^{-1}$
1.74	651	26.1	0.031	0.102

表 4.7-51　镁合金的物理性能

合金 (ASTM)	密度 /g·cm^{-3}	热导率 /W·(m·K)$^{-1}$	电阻率 /μΩ·cm	熔化温度 /℃	合金状态
AZ31B	1.77	75.42	9.2	643～650	板材
ZE10XA	1.76	138.27	5.0	566～627	—
MIA	1.76	138.27	5.0	532～619	变形合金
AZ31B	1.77	75.42	9.2	488～610	变形合金
AZ61A	1.80	58.66	12.5	499～635	变形合金
AZ80A	1.80	50.28	14.5	566～627	变形合金
ZK60A	1.83	121.51	5.7	—	板材
ZK20XA	1.78	—	—	—	—
AZ63A	1.83	54.47	13.0	443～610	铸造合金
AZ92A	1.82	58.66	12.6	443～599	铸造合金
AZ91C	1.81	46.09	16.4	469～604	铸造合金
AZ81A	1.81	50.28	15.2	457～599	铸造合金
AZ91A	1.81	46.09	16.4	469～604	变形合金
KH31A	1.79	104.75	6.6	589～645	铸造合金
HM21XA	1.78	138.27	5.0	604～650	变形合金
EK41A	1.81	100.56	6.9	589～645	铸造合金
EZ33A	1.83	100.56	7.0	604～650	铸造合金
HK31A	1.76	92.18	7.7	591～645	变形合金
HZ32A	1.83	108.94	6.5	552～948	铸造合金

镁及镁合金的晶体结构是密排六方晶格，密度为 1.7 g/cm^3。熔点低、线胀系数和铝基本相同、热导率较高比铝稍低，焊接时易产生变形。

镁及镁合金在空气中受热易氧化，形成 MgO 薄膜。MgO 薄膜在高温下会发生再结晶，厚度增加，易脱落，在焊接过程中易破碎。MgO 薄膜熔点较高，不能溶解于熔池中，易形成氧化夹杂。

2.1.2　镁及镁合金牌号、成分和性能

镁合金分为铸造镁合金和变形镁合金，铸造镁合金用 ZM 表示；变形镁合金按 GB/T 5153—2003 的规定表示。

镁及镁合金的力学性能见表 4.7-52 和表 4.7-53 所示，镁的力学性能与组织状态有关，变形加工后力学性能明显提高。镁的抗拉强度与纯铝相近，但屈服强度和塑性却比铝低，这是镁及多数镁合金的一个缺点。

表 4.7-52　工业纯镁的力学性能

状态	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ/%	断面收缩率 ψ/%	硬度 HB
铸态	115	25	8.0	9	3.0
变形状态	200	90	11.5	12.5	36.0

镁的合金化一般是利用固溶时效处理产生的沉淀硬化来提高合金的常温和高温性能。合金元素在镁基体中应具有较高的固溶度，随温度升高有较明显的变化，时效过程中能形成强化效果显著的第二相。选择合金元素时应考虑对合金腐蚀性能和工艺性能的影响。实际应用的镁合金，无论是铸造镁合金还是变形镁合金，主要有以下几种合金系：

高强镁合金：Mg－Al－Zn 系，如 AZ40M、AZ41M、ZM1；Mg－Zn－Zr 系，如 ZM1、ZK61M。

表 4.7-53　铸造镁合金的主要成分和高、低温力学性能

牌号	主要成分（质量分数）/% Zn	Zr①	Mn	RE①	Nd②	Al	热处理状态	20℃ σ_b /MPa	20℃ δ /%	250℃ σ_b /MPa	250℃ $\sigma_{0.2/100}$③ /MPa	300℃ σ_b /MPa	300℃ $\sigma_{0.2/100}$③ /MPa
ZM1	3.5～5.5	0.5～1.0	—	—	—	—	T_1、T_6	240	5.0	—	—	—	—
ZM2	3.5～5.0	0.5～1.0	—	0.7～1.7	—	—	T_1	220	4.0	—	—	—	—
ZM3	0.2～0.7	0.4～1.0	—	2.5～4.0	—	—	T_2	145	3.0	145	25	110	—
ZM4	2.0～3.0	0.5～1.0	—	2.5～4.0	—	—	T_1	150	4.0	130	30	95	—
ZM5	0.2～0.8	—	0.15～0.5	—	—	7.5～9.0	T_4 (T_6)	230 (230)	5 (2)	—	—	—	—
ZM6	0.2～0.7	0.4～1.0	—	—	2.0～3.0	—	T_6	260	5.0	170	38	110	—
ZM8	5.5～6.5	0.5～1.0	—	2.0～3.0	—	—	T_6	310	9.5	—	—	—	—
ZM9		Mg－Y－Zn－Zr 系					T_1	220	8.0	140	51	115	27

① Zr—下限为溶解 Zr，总量达 1.0%；RE—Ce≥45%的混合稀土。
② Nd—Nd≥85%的混合稀土。
③ $\sigma_{0.2/100}$—100 h 内残留变形≤0.2%的蠕变强度。

耐热镁合金：Mg－RE－Zr 系，或 Mg－RE－Mn 系如 ZM8、ME20M。

表 4.7-53 列出了铸造镁合金的主要成分和高、低温力学性能。表 4.7-54 中列出了变形镁合金的牌号与主要成分。表 4.7-55 列出了变形镁合金的力学性能。

镁合金的主要优点是能减轻产品的重量，主要缺点是在潮湿大气中耐腐蚀性能差，缺口敏感性较大。镁在水及大多数酸盐溶液中易遭腐蚀，只在氢氟酸、铬酸、碱及汽油中比较稳定。

表 4.7-54　变形镁合金的牌号及主要成分（质量分数）　%

牌号	Al	Zn	Mn	Ce	Zr
M2M	—	—	1.3～2.5	—	—
AZ40M	3.0～4.0	0.2～0.8	0.15～0.5	—	—
AZ41M	4.0～5.0	0.8～1.5	0.4～0.8	—	—
AZ61M	5.5～7.0	0.5～1.5	0.15～0.5	—	—
AZ62M	5.0～7.0	2.0～3.0	0.20～0.50	—	—

续表 4.7-54

牌号	Al	Zn	Mn	Ce	Zr
AZ80M	7.8~9.2	0.2~0.8	0.15~0.5	—	—
ME20M	—	—	1.5~2.5	0.15~0.35	—
ZK61M	—	5.0~6.0	—	—	0.30~0.90

表 4.7-55 Mg-Al-Zn 系变形镁合金的力学性能

牌号	σ_b	$\sigma_{0.2}$	HB	δ/%	状态
	/MPa				
AZ40M	240	130	45	12.0	0.8~3.0 mm 退火板（M）
AZ41M	250	150	—	12.0	0.8~3.0 mm 退火板（M）
	200	110	—	5.0	模锻铁（R）
AZ61M	260	—	50	8.0	锻件、模锻件，退火（M）
M2M	290	—	55	7.0	热挤棒（R）
	300	—	55	10.0	淬火处理（T_4）棒材
AZ80M	300	—	55	8.0	淬火处理（T_4）棒材

2.2 镁及镁合金的熔焊

2.2.1 焊接性

镁及镁合金焊接时出现的问题和铝类似，只是镁比铝更易氧化，在保护上要求更加严格。

1）粗晶 镁的熔点低（651℃）、导热快，焊接时需要大功率热源，焊缝及近缝区金属易产生过热和晶粒长大，这是焊接镁及镁合金时的显著特点之一。

2）氧化和蒸发 镁的氧化性极强，在焊接高温下，易形成氧化镁（MgO），MgO 熔点高（2 500℃，密度大 3.2 g/cm³），在熔池中易形成细小片状的固态夹渣，降低焊缝的性能，在高温下，镁还容易和空气中的氮化合生成镁的氮化物，使接头性能变坏。

镁的沸点不高（1 100℃），因此在电弧高温下镁很易蒸发。

3）热应力 镁及镁合金热膨胀数较大，约为钢的 2 倍，铝的 1.2 倍，焊接过程中易引起较大的焊接应力和变形。

4）焊接裂纹 镁易与一些合金元素（如 Ci、Al、Ni 等）形成低熔点共晶体（如 Mg-Cu 共晶点为 480℃，Mg-Al 共晶点为 430℃，Mg-Ni 共晶熔点为 508℃），脆性温度区间较宽，易形成热裂纹。

① 镁-锰系二元合金（如 ME20M），具有很窄的结晶范围（645~651℃），热裂纹倾向小，焊接性能好。为改善合金的力学性能、热稳定性及细化晶粒，一般在 ME20M 合金中加入（0.15~0.35）%的稀土元素铈（Ce）（质量分数）。ME20M 的金相组织由 $\alpha+\beta$（Mn）+ Mg9Ce 组成，在经过二次或多次加热的近缝区常常析出条状的由金属间化合物 Mg9Ce 组成的低熔点共晶体，为了消除 Ce 的影响，采用焊丝中加 W（Al）4%~5%来夺取 Ce，生成均匀分布在晶粒边界的 Al_2Ce。

② 镁-铝-锌系合金（如 AZ41M），在镁中加入 Al 和 Zn，可阻止焊接时晶粒长大。焊接 Mg-Al-Zn 合金时，如变形镁合金 AZ40M、AZ61M、AZ62M、AZ80M 和铸造镁合金 ZM5 等，随着铝和锌含量增高，结晶区显著增大，共晶体量增多。锌加入合金后能提高屈服强度，降低伸长率，增大合金的热裂倾向。焊接时，有产生焊接裂纹和过烧的倾向。

③ 镁-锌-锆系合金（如 ZK61M、ZM1、ZM2、ZM3）结晶范围大，焊接时热裂倾向大，焊接性不良。若采用含稀土的合金焊丝，高温预热，热裂纹倾向可显著减小。

镁-锌-锆-稀土系合金热裂倾向减小（特别是横向裂纹和弧坑裂纹减小更为显著），焊接性能较好，可采用结晶范围宽和熔点低于母材的焊丝。

5）焊缝气孔 与铝及铝合金焊接类似，镁及镁合金焊接时易产生氢气孔，氢在镁中的溶解度随温度的降低而急剧减小，当氢的来源较多时，出现焊缝气孔的倾向较大。

镁及镁合金在没有隔绝氧的情况下焊接时，易燃烧，熔焊时需用惰性气体或焊剂保护。镁及镁合金焊接时要求用大功率的热源，当焊接接头处温度过高时，母材将产生“过烧”现象，焊接时必须控制好热输入。

2.2.2 焊接工艺

1）坡口设计 镁及镁合金焊接和补焊时，坡口设计很重要。表 4.7-56 列出了焊接时的坡口形式。补焊时，将缺陷（焊接裂纹、焊缝气孔、疏松、缩孔等）全部清除掉，加工成坡口。坡口形状因缺陷大小不同而不同，一般形状见图 4.7-46。坡口宜加工成圆角，不能带尖角，圆半径一般要大于 8~10 mm，以免产生焊接裂纹。清除缺陷时，尽量不要将构件挖穿。必须挖穿时，坡口根部宜留 1.5~2 mm 的钝边。背面采用铜或不锈钢垫板，以避免焊穿。

表 4.7-56 镁合金焊接接头的坡口形式

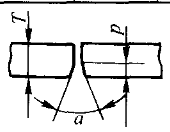
序号	接头名称	坡口形式	适用厚度/mm	几何尺寸					焊接方法
				a/mm	c/mm	b/mm	p/mm	α/mm	
1	不开坡口对称		≤3.0	0~0.2T	—	—	—	—	钨极手工或自动氩弧焊
2	外角接		>1.0		0.2T	—	—	—	钨极手工或自动氩弧焊（加填充焊丝）
3	搭接		>1.0	—	—	3~4T	—	—	钨极手工或自动氩弧焊

续表 4.7-56

序号	接头名称	坡口形式	适用厚度/mm	几何尺寸					焊接方法
				a/mm	c/mm	b/mm	p/mm	α/mm	
4	V 形坡口 对称		3~8	0.5~2.0	—	—	0.5~1.5	50~70	用可折垫板加填充焊丝的钨极手工或自动氩弧焊
5	X 形坡口 对称		≥20	1.0~2.0	—	—	0.8~1.2	60	加填充焊丝的钨极手工或自动氩弧焊

注：1. 不开坡口的对接接头，如仅在一面施焊时，应在其背面加工坡口，以防止产生不熔合或夹渣缺陷，坡口尺寸见附图。

2. 附图中 $p=\frac{1}{3}T$；$\alpha=10°\sim30°$。



2）表面清理　镁合金结构焊前必须清除表面氧化膜、油脂和其他污物。清理方法有机械法和化学法。为防止腐蚀，镁合金通常都进行氧化处理，使表面有一层铬酸盐填充的氧化膜，这层氧化膜是焊接时的重大障碍，焊前必须彻底清除。机械法清理时可以用刮刀或 ϕ0.15~0.25 mm 直径的不锈钢丝刷从正反面将焊缝区 25~30 mm 内污物及氧化层除掉。板厚小于 1 mm 时，背面氧化膜可不清除，它可以防止烧穿，避免发生焊缝塌陷现象，应用溶剂将背面油质或尘污等除掉。焊件表面清理后，应在 8 h 之内焊接完毕，否则应重新清理。

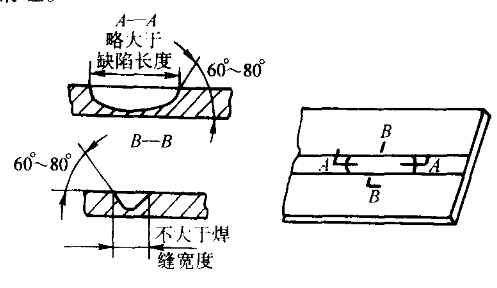


图 4.7-46　焊补坡口形式

化学清理适合于大批量生产，清理后的焊件可放置 10 天。化学清理规范见表 4.7-57。

焊丝使用前，必须仔细清理焊接表面。机械清理是用刮刀或刷子去除氧化皮。化学清理一般是将焊丝浸入 20%~25%硝酸溶液（质量分数）中浸蚀 2 min，然后在 50~90℃ 的热水中冲洗，再进行干燥。也可按表 4.7-54 方法进行清理。清理后焊丝一般应在当天用完（天气干燥时，可存放 10 天）。

3）焊前预热　镁合金构件厚度较大，拘束度较强，特别是大型铸件补焊时需要预热。预热分整体预热和局部预热。对要求较高的镁合金铸件，可采用炉内整体预热，预热温度为 350~400℃，在 2~2.5 h 内升温到预热温度，保温时间一般以 25 mm 厚度一个小时计算。一般以电阻丝或氧乙炔焰局部加热被焊处。在不预热的条件下采用气焊或氩弧焊进行补焊也可获得良好的效果。

4）焊后处理　镁合金焊后处理包括焊后表面清理和焊后热处理。焊后表面清理的目的是清除焊后残留的焊剂、化学清除之后进行表面光化处理，清除和光亮方法见表 4.7-58。

焊后热处理主要用于铸造镁合金，目的是改善焊接接头的组织性能，消除焊接应力，降低应力腐蚀倾向。焊后热处理规范见表 4.7-59。

5）焊丝和熔剂选择　一般可选用与母材化学成分相同的焊丝。有时为了防止在近缝区沿晶界析出低熔点共晶体，增大金属流动性，减少裂纹倾向，可采用与母材不同的焊丝。在焊接镁－锰系合金（如 MB8）时，为防止产生金属间化合物 Mg9Ce 所组成的低熔点共晶体，应选用 MB_8 的焊丝。表 4.7-60 列出了常用镁合金的焊接性及与相适应的焊丝。

表 4.7-57　化学法清理规范

序号	工作内容	槽液成分 /g·L^{-1}	工作温度 /℃	处理时间 /min
1	除油	NaOH　10~25 Na_3PO_4　40~60 Na_2SiO_3　20~30	60~90	5~15 将零件在碱液中抖动
2	在流动热水中洗		50~90	4~5
3	在流动冷水中洗		室温	2~3
4	碱腐蚀	NaOH　350~450	对 MB_8，70~80 对 MB_3，60~65	2~3 5~6
5	在流动热水中洗		50~90	2~3
6	在流动冷水中洗		室温	2~3
7	在铬酸中中和处理	CrO_3　150~250 SO_4　<0.4	室温	5~10 或将零件上的锈除尽为止
8	在流动冷水中洗			2~3
9	在流动热水中洗		50~90	1~3
10	用干燥热风吹干		50~70	吹干为止



表 4.7-58　镁合金焊后化学清理液成分和使用方法

种　类	清理液成分	使用方法	用　途
清除焊剂	$Na_2Cr_2O_7\cdot 2H_2O$　227 g 水 3.785 L　温度 80℃～100℃	浸 1.5～2 h，冷水冲洗再热水冲洗，空气中干燥	用热水和铬酸清洗可完全清除残余焊剂
铬酸清洗	$Na_2Cr_2O_7\cdot 2H_2O$　680 g 水 3.785 L　温度 21℃～32℃	浸 1～2 min，在空气中停留 5 s后，冷水冲洗再热水冲洗，空气中干燥	用于涂料打底保护表面的清理
点焊清理	$H_2Cr_2O_4$ 680 g　H_2SO_4 1.9 mL 水 3.785 L　温度 21℃～32℃	浸 3 min，冷水冲洗，空气中干燥	表面脱脂，清除氧化膜，接触电阻低
重铬酸处理	①：HF 1 个容积单位 水 2 个容积单位 温度 21℃～32℃ ② $Na_2Cr_2O_7\cdot 2H_2O$ 454 g MgF_2 9.5 g　水 3.785 L 温度 100℃	先在①中浸 5 min，冷水冲洗，在②中煮 45 min 后，冷水冲洗再热水冲洗，空气中干燥	用于涂料打底的表面清理
光化酸洗	$H_2Cr_2O_4$ 680 g $NaNO_3$ 113 g CaF_2 3.5 g 水 3.785 L 温度 21℃～32℃ 洗净液 Na_3SO_3 198.5 g 水　3.785 L	浸 1～3 min 后，冷水冲洗再热水冲洗，烘干	电弧焊、气焊表面清理

表 4.7-59　铸造镁合金焊后热处理规范

合　金	预热温度/℃	焊接材料	焊前状态	要求焊后状态	焊后热处理
AZ63A	385±5	AZ92A 或 AZ63A	固溶+时效	固溶+自然时效	388℃×0.5 h
		AZ63A	固溶+时效	固溶+自然时效	388℃×2 h
		AZ63A	铸态	固溶+自然时效	386℃×10 h
		AZ92A 或 AZ93A	固溶+时效	固溶+人工时效	388℃×0.5 h+218℃×5 h
		AZ63A	铸态	固溶+人工时效	385℃×10 h+218℃×5 h
AZ92C	400	AZ92A	固溶+时效	固溶+时效	410℃×0.5 h
AZ91C	400	AZ92A	固溶+时效	固溶+时效	410℃×0.5 h+260℃×4 h
AZ81A	400	AZ92A	固溶+时效	固溶+时效	416℃×0.5 h
EK30A	260	EZ33A	固溶+人工时效	固溶+人工时效	204℃×16 h
EK41A	260	EZ33A	固溶+时效	固溶+时效	204℃×16 h
EZ33A	260	EZ33A	固溶+时效	固溶+时效	316℃×2h+216℃×5 h
HK31A	204	EK31A	固溶+人工时效	固溶+人工时效	204℃×16 h
HZ32A	260	HZ32A	固溶+时效	固溶+时效	343℃×2 h+316℃×16 h

表 4.7-60　常用镁合金的焊接性及适用焊丝

合金牌号	结晶区间/℃	焊接性	适用焊丝
M2M	646～649	良	M2M
AZ40M	565～630	良	AZ40M
AZ41M	545～620	良	AZ41M
AZ61M	510～615	可	AZ61M
AZ62M	454～613	—	—
AZ80M	430～605	可	AZ80M
ME20M	646～649	良	ME20M
ZK61M	515～635	尚可	ZK61M

在小批量生产时可采用边角料作焊丝，但应将表面加工均匀光洁，最好采用热挤压成形的焊丝。铸件焊接和焊补时可采用铸造焊丝。焊丝铸模如图 4.7-47 所示。

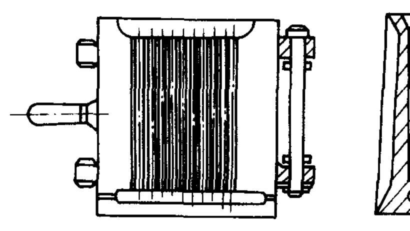
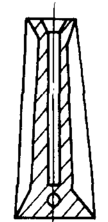



图 4.7-47　镁合金焊丝铸模示意图



大批量生产时应选用挤压成形的焊丝。焊丝使用前要认真挑选、鉴定，方法是将焊丝反复弯曲，有缺陷的（如疏松、夹渣、气孔）焊丝很容易被折断。

镁合金气焊时应使用熔剂。对氧化膜有还原和溶解作用，对熔池有保护作用。

熔剂配制：氟化锂 36%，氟化钙 17%，氟化钡 20%，氟化镁 18%，氟化钠 9%。水含量 < 1%，其他杂质 < 1%。按比例配制后，将材料炉中烘干，先 120℃保温 30 min，再 140℃保温 1 h，再 160℃保温 30 min，研磨，100 目筛子过筛，装入带色的玻璃瓶内封存，制作完毕。研磨时注意不能吸潮。

2.2.3　气焊

由于气焊火焰的热量散布范围大，焊件加热区域较宽。所以焊缝的收缩应力大，容易产生裂纹等缺陷，残留在对接、角接接头的焊剂、溶渣容易引起焊件的腐蚀，因此气焊法主要用于不太重要的镁合金薄板结构的焊接及铸件的焊补。

焊前先将焊件、焊丝进行清洗，并在焊件坡口处及焊丝表面涂一层调好的焊剂，涂层厚度一般不大于 0.15 mm。

气焊镁合金时，应采用中性焰的外焰进行焊接，不可将焰心接触熔化金属，熔池应距离焰心 3 ~ 5 mm，应尽量将焊缝置于水平位置。气焊工艺参数见表 4.7-61。

表 4.7-61　镁合金的气焊工艺参数

焊件厚度 /mm	焊炬型号	焊丝尺寸/mm		乙炔气消耗量 /L·h⁻¹	氧气压力 /MPa
		圆截面	方截面		
1.5 ~ 3.0	H01 ~ 6	$\phi3$	3 × 3	100 ~ 200	0.15 ~ 0.2
3 ~ 5	H01 ~ 6	$\phi5$	4 × 4	200 ~ 300	0.2 ~ 0.22
5 ~ 10	H01 ~ 12	$\phi5$ ~ 6	6 × 6	300 ~ 600	0.22 ~ 0.3
10 ~ 20	H01 ~ 12	$\phi6$ ~ 8	8 × 8	600 ~ 1 200	0.3 ~ 0.34

补焊镁合金铸件时，始焊时焊炬与铸件间成 70° ~ 80°角。以便迅速加热始焊部位，一直至其表面熔化后再填加焊丝。熔池形成后，焊炬与焊件表面的倾角应减小到30° ~ 45°，焊丝倾角应为 40° ~ 45°，以减小火焰加热金属的热量，加速焊丝的熔化，增大焊接速度。焊丝端部和熔池应全部置于中性焰的保护气氛下。焊接过程中，焊丝应置于熔池中，并不断进行搅拌，以破坏熔池表面的氧化膜，将熔渣引出熔池外。焊接进行到末端或缺陷边缘时，应加大焊接速度，并减小焊炬的倾斜角度。焊接过程中，不要移开焊炬，要不间断地焊完整条焊缝。在非间断不可时，应缓慢地移去火焰，防止焊缝发生强烈冷却。当焊接过程中偶然间断在焊缝末端，并再次焊接时，可将已焊好的焊缝末端金属重熔 6 ~ 10 mm 长。

若焊件坡口边缘发生过热，则应停止焊接或增大焊接速度和减小气焊炬的倾斜角度。

铸件厚度大于 12 mm 时，可采用多层焊。层间必须用金属刷（最好是细黄铜丝刷）清刷后，再焊下一层。薄壁件焊接时反面易产生裂纹。为消除裂纹，应保证反面焊透，并在反面形成一定的余高。正面焊缝高度应高于基体金属表面 2 ~ 3 mm，如图 4.7-48 所示。

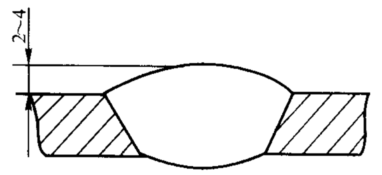


图 4.7-48　补焊后的焊缝截面示意图

在壁厚不同的焊接部位，焊接时火焰应指向厚壁零件，以使受热尽量均匀。为了消除应力，防止裂纹，补焊后应立即放入炉内进行回火处理，回火温度为 200 ~ 250℃，时间为 2 ~ 4 h。

2.2.4　钨极氩弧焊

氩弧焊是镁合金最常用的焊接方法，热影响区尺寸和变形比气焊小，焊缝的力学性能和耐腐蚀性能比气焊高。主要采用手工钨极氩弧焊和自动钨极氩弧焊。

1）焊接工艺参数　镁合金的手工、自动钨极氩弧焊焊接工艺参数见表 4.7-62 及表 4.7-63。

镁合金氩弧焊一般用交流电源，焊接电流的选择主要决定于合金成分、板料厚度和反面有无垫板等。如 MB8 比 MB3 具有较高的熔点，MB8 比 MB3 的焊接电流大 1/6 ~ 1/7。为了减小过热，防止烧穿，焊接镁合金时，应尽可能实施快速焊接，如焊镁合金 MB8，当板厚 5 mm，V 形坡口，反面用不锈钢成型垫板时，焊速可达 35 ~ 45 cm/min 以上。

表 4.7-62　变形强化镁合金手工钨极氩弧焊焊接工艺参数

板材厚度 /mm	接头形式	钨极直径 /mm	焊丝直径 /mm	焊接电流/A	喷嘴孔径 /mm	氩气流量 /L·min⁻¹	焊接层数
1 ~ 1.5	不开坡口对称	2	2	60 ~ 80	10	10 ~ 12	1
1.5 ~ 3.0	同上	3	2 ~ 3	80 ~ 120	10	12 ~ 14	1
3 ~ 5	同上	3 ~ 4	3 ~ 4	120 ~ 160	12	16 ~ 18	2
6	V 形坡口对接	4	4	140 ~ 180	14	16 ~ 18	2
18	同上	5	4	160 ~ 250	16	18 ~ 20	2
12	同上	5	5	220 ~ 260	18	20 ~ 22	3
20	X 形坡口对接	5	5	240 ~ 280	18	20 ~ 22	4

表 4.7-63　变形强化镁合金自动钨极氩弧焊焊接工艺参数

板厚 /mm	接头形式	焊丝直径 /mm	氩气流量 /L·min⁻¹	焊接电流 /A	送丝速度 /m·h⁻¹	焊接速度/m·h⁻¹	备　注
2	不开坡口对接	2	8 ~ 10	75 ~ 110	50 ~ 60	22 ~ 24	反面用垫板，单面单层焊接
3	不开坡口对接	3	12 ~ 14	150 ~ 180	45 ~ 55	19 ~ 21	
5	不开坡口对接	3	16 ~ 18	220 ~ 250	80 ~ 90	18 ~ 20	
6	不开坡口对接	4	18 ~ 20	250 ~ 280	70 ~ 80	13 ~ 15	
10	V 形坡口对接	4	20 ~ 22	280 ~ 320	80 ~ 90	11 ~ 12	
12	V 形坡口对接	4	22 ~ 25	300 ~ 340	90 ~ 100	9 ~ 11	



钨极直径取决于焊接电流的大小，在焊接中钨极头部应熔成球形但不应滴落。

选择喷嘴直径的主要依据是钨极直径及焊缝宽度。钨极直径和焊枪喷嘴直径不同时，氩气流量不同。氩气纯度要求较高，一般应采用一级纯氩（99.99%以上）。

氩气压力一般为0.3～0.7相对大气压，宜形成“软气流”，压力大时焊缝表面成型不良，压力小时焊缝保护不好。焊接速度加快时，氩气流量相应增大。

对接焊不同厚度的镁合金时，在厚度板侧需削边，使接头处两零件保持厚度相同。削边宽度等于3～4倍板厚。焊接工艺参数按板材的平均厚度选择，在操作时钨极端部应略指向厚板一侧。

铸件补焊工艺参数见表4.7-64，预热的焊件工艺参数选用表中的下限值，不预热的焊件选用上限值。

表4.7-64　铸造镁合金补焊工艺参数

材料厚度/mm	焊接电流/A	钨极直径/mm	喷嘴直径/mm	焊丝直径/mm	氩气流量/$L\cdot min^{-1}$	氩气压力/MPa	缺陷深度/mm	焊接层数
<5	60～100	2～3	8～10	3～5	7～9	0.2～0.3	≤5	1
5.1～10	90～130	3～4	8～10	3～5	7～9	0.2～0.3	≤5 5.1～10	1 1～3
10.1～20	100～150	3～5	8～11	3～5	8～11	0.2～0.3	≤5 5.1～10 10.1～20	1 1～3 2～5
20.1～30	120～180	4～6	9～13	5～6	10～13	0.2～0.3	≤5 5.1～10 10.1～20 20.1～30	1 1～3 2～5 3～8
>30.1	150～250	5～6	10～14	5～6	10～15	0.2～0.3	≤5 5.1～10 10.1～20 20.1～30 >30	1 1～3 2～5 3～8 6以上

2）焊接操作技术　镁合金钨极氩弧焊时，在板厚5 mm以下，通常采用左焊法，大于5 mm通常采用右焊法。平焊时，焊炬轴线与已成形的焊缝成70°～90°角。焊枪与焊丝轴线所在的平面应与焊件表面垂直。焊丝应贴近焊件表面送进，焊丝与焊件间的夹角为5°～15°。焊丝端部不得浸入熔池，以防止在熔池内残留氧化膜。焊丝应作前后不大的往复运动，但不作横向摆动，这样可借助于焊丝端头对熔池的搅拌作用，破坏熔池表面的氧化膜并便于控制焊缝余高。

焊接时应尽量压低电弧（弧长2 mm左右），以充分发挥电弧的阴极破碎作用并使熔池受到搅拌便于气体逸出熔池。

2.2.5　熔化极氩弧焊

熔化极氩弧焊比手工氩弧焊更适合焊接镁合金，采用直流反极性，熔滴射流过渡形式。脉冲熔化极氩弧焊效果更好。

1）坡口设计　镁合金焊接厚度小于5 mm时，对接不开坡口；厚度10～20 mm时，对接开50°～60°V形坡口，钝边2～3 mm，厚度大于20 mm时，对接开60°～80°X形坡口，钝边2～3 mm。见图4.7-49

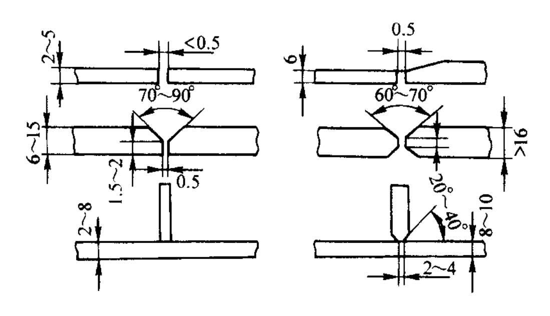


图4.7-49　镁合金熔化极氩弧焊坡口形式

2）规范参数　镁合金熔化极氩弧焊为实现射流过渡，焊接规范参数参见表4.7-65。

表4.7-65　镁合金熔化极氩弧焊焊接规范参数

焊丝直径/mm	送丝速度/$m\cdot min^{-1}$	焊接电流/A	焊接电压/V	最大焊接电流/A
1.2	20.3～21.6	180～200	24～28	420
1.62	13～14.2	220～265	24～28	420
2.4	8.13～8.4	325～350	24～28	500
3.2	7.0～7.62	420～440	26～30	620

喷嘴距工件表面及导电嘴的距离应分别控制在10～15 mm和5～10 mm。距离过大，气体保护效果不好，距离过小，导电嘴易过热，金属溅渣易堵塞喷嘴，使焊接过程不稳定。焊接不开坡口或坡口较小的对接接头时，电极应垂直于工件表面。焊接坡口深、厚度大的对接接头时，电极应向前倾斜7°～15°为宜。

镁合金脉冲熔化极氩弧焊保护气体采用75% Ar + 25% He，焊接过程稳定，接头强度系数可达0.86～1.0。气焊时接头强度系数仅为0.6～0.75。

3）接头性能　镁合金焊接接头性能见表4.7-66。

2.2.6　真空电子束焊

镁合金真空电子束焊存在的问题有：①烧穿　镁熔体的表面张力太小，仅为559 mN/m，约为铝熔体表面张力（914 mN/m）的一半，熔化金属易流失形成烧穿。增加焊接速度可解决烧穿问题。②焊缝气孔　电子束摆动和降低焊接速度有利于消除焊缝气孔。③高压放电　镁合金易蒸发，金属蒸气易引发高压放电。解决烧穿和焊缝气孔的措施相互矛盾，使镁合金真空电子束焊的参数范围较窄。

纯镁采用150 kV、6 kW真空电子束焊机，真空度3×10^{-3} Pa，束流5 mA，焊接速度5.0 mm/s。焊缝质量良好，接头强度系数为1.0，伸长率为13%，断在焊缝中心。焊缝的冲击韧性和母材基本一样。



表 4.7-66 镁合金 MIG 焊接接头性能

接头类型	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%	收缩率 /%	电源模式
AZ31/AZ31 锻件/锻件	242	135	10.8	5.6	标准式
AZ31/AZ31 锻件/锻件	228	89	7.7	9.4	脉冲式
AZ91/AZ91 锻件/锻件	291	225	4.4	6.8	标准式
AZ91/AZ91 铸件/铸件	184	125	2.9	8.5	脉冲式
AZ31/AZ61 锻件/锻件	215	93	4.8	10.2	脉冲式
AZ61/AZ61 锻件/锻件	287	200	6.3	7.9	脉冲式
AZ61/AZ91 铸件/铸件	186	138	2.7	7.8	脉冲式
AZ31/AZ91 铸件/铸件	193	113	5.7	8.6	脉冲式

AZ31 镁合金化学成分为 Mg - 3.0Al - 0.90Zn - 0.31Mn，拉伸强度为 247 MPa，延伸率为 24%，冲击韧性 55 kJ/m^2，厚度 4 mm。采用 150 kV、6 kW 真空电子束焊机，真空度 3×10^{-3} Pa，束流 5 mA，焊接速度 5.0 mm/s。焊缝质量良好，接头强度系数 0.997，延伸率为 4.8%。断在熔合线上，焊缝的冲击韧性为母材的 87%。TIG 焊时，接头强度系数为 0.80，延伸率为 14.4%。

AM50 镁合金真空电子束焊接效果良好，接头拉伸强度为 215 MPa，延伸率为 17%。

2.2.7 激光焊

激光束斑点小，能量密度高，使得焊接热输入量小，焊缝尺寸和热影响区尺寸较小，这对线胀系数较大的镁及镁合金至关重要。

镁及镁合金激光焊的特点是：①对激光能量的吸收效果好；②固体激光器优于 CO_2 激光器；③常出现焊缝气孔，填加焊丝可减少焊缝气孔。图 4.7-50 示出了焊接 AZ21 镁合金时采用固体激光器和 CO_2 激光器时激光功率和熔深的关系。

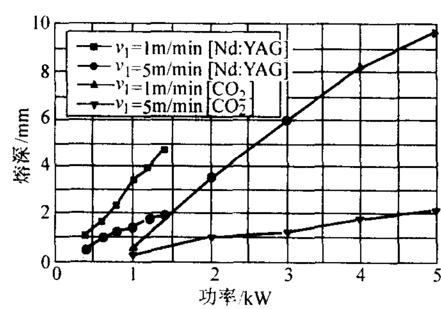


图 4.7-50 镁合金激光焊时激光功率和熔深的关系

镁及镁合金激光焊参数和性能见表 4.7-67。

表 4.7-67 镁及镁合金激光焊参数

合 金	焊 丝	厚度 /mm	激光功率 /kW	焊接速度 /m·min^{-1}	接头强度 /MPa	伸长率/%	断裂位置
AZ855	AZ92A	3.0	2.5	9.0	母材强度	—	—
AZ91 铸态 T4 焊后 + T6	AZ92	5	2.0	1.25	192	2.7	母材
QE22 铸态 T4	QE22	5	2.0	1.25	194	7.7	母材
QE22 铸态 T4 焊后 + T6	QE22	5	2.0	1.25	250	4.3	50%在母材
WE54 铸态 T6	WE54	5	2.0	1.25	208	3	熔合区
WE54 铸态 T6 焊后 + T6	WE54	5	2.0	1.25	219	3.5	熔合区
AZ61 锻态 焊后 + 退火	AZ92	5	2.0	1.25	240	3.3	熔合区

2.2.8 焊接缺陷防止措施

镁及镁合金在焊接过程中常出现的缺陷有裂纹、气孔、夹渣、未焊透和过烧等。

1) 焊接裂纹　焊接镁合金过程中由于镁合金种类不同，其产生裂纹敏感性是不同的，结晶区间越大就越容易产生焊接裂纹。在气焊条件下，由于焊接热影响区较大，很容易产生裂纹，但是对于氩弧焊，由于焊接热源较为集中，热影响区较小，产生裂纹的倾向性要小得多，但是，有时候在选择填充材料不当，规范不正确，操作不慎的条件下也会产生裂纹。为此，必须正确选择焊接材料和操作规范，对于大厚度件、刚性较强的结构件，采取预热和缓冷的方法可以有效避免产生裂纹。



2）焊缝气孔 在焊接过程中产生气孔，主要原因是焊前焊件表面、焊丝表面有油污、氧化物等，焊前清理不干净。此外，焊件及焊丝中焊前就存在有疏松，微观孔洞中的氢随着温度的降低，熔解度下降，便产生气孔。还有杂质含量过高，也会产生气孔。在操作时如果氩气流量过大，影响氩气的保护效果，使空气卷入；如氩气流量过小时，保护效果不良，也同样会使空气进入熔池，也会产生气孔。防止方法是加强表面清理，加强气体保护，焊件有缺陷必须清理干净，严格控制焊接规范，保持焊接过程稳定。

3）焊接夹渣 镁合金焊接时，可能出现的夹渣主要有熔剂夹渣、氧化物夹渣及夹钨等。熔剂和氧化物夹渣大多数情况下是在气焊时出现较多。对氧化物夹渣在氩弧焊时，由于氩气不纯，气体流量过大或过小，工件清理不彻底，也可能出现氧化物夹渣。在钨极氩弧焊条件下，可能出现夹钨。

熔剂夹渣是在气焊时因使用的熔剂吸潮，操作上未能引起重视，为引出熔池而夹渣。氧化夹渣是在焊接高温中形成的氧化物进入熔池不能溢出，钨极与熔池接触及镁合金焊接时放炮，产生局部液体飞溅会引起夹钨。

防止措施：①吸潮的熔剂必须烘干后使用；焊接过程中焊丝可深入熔池搅拌，使夹渣在液态下溢出熔池。②操作时，加强对熔池的保护，不可中断或离开熔池金属，要采用高纯度的氩气，流量大小要适中。多层焊时要加强焊缝表面氧化物的清理，焊接时要选择小电流、加强冷却，防止钨极过热。

4）未焊透 焊接中加热不足，熔池金属温度低，送丝不及时，焊接速度过快，中断焊接次数多等均可造成未焊透缺陷。镁合金的氧化物膜熔点较高，会组织熔滴与母材熔合。焊接时要清理坡口表面，要正确选择焊接规范，控制操作过程的每一个操作细节，焊接热输入既能使加热充分，又不能使金属过热。

5）过烧 镁合金焊接时，由于焊接加热功率过大，时间过长，焊接接头温度过高，使镁合金组织中的低熔点化合物在晶界处熔化而出现孔穴以及镁合金由于温度过高在晶界处引起氧化现象而造成过烧。这种缺陷虽不易出现，但是一旦出现将严重影响接头性能。为此，必须正确选择焊接规范和焊接线能量，控制好熔池温度。

2.3 镁及镁合金的电阻焊

某些镁合金框架、仪表舱、隔板等常采用电阻点焊。

1）镁合金电阻点焊性 镁合金具有良好的导电性和导热性，在点焊时，需在较短的时间内通过大电流；

镁的表面易氧化，零件间的接触电阻增大，当通过大的焊接电流时，易产生飞溅。

断电后熔核开始冷却，由于镁合金导热性好及线膨胀系数大，熔核收缩快，易引起缩孔和焊接裂纹。

2）焊前准备 点焊机应能保证瞬时快速加热。直流冲击波点焊机及一般的交流点焊机均适用于镁合金点焊。点焊电极选用高导电性的铜合金，电极端部需打磨光滑，打磨时注意及时清理铜屑。

镁合金点焊前需清理焊件表面氧化膜，清理后立即点焊，焊后焊接压痕上不能粘有电极铜，如有应清理掉。

3）点焊参数 在选择点焊参数时，先大概选择电极压力值，然后再调节焊接电流及通电时间。焊接电流及电极压力过大，会导致焊件变形。焊点凝固后电极压力需保持一定时间，若压力维持时间太短，焊点内容易出现气孔、裂纹等缺陷。镁合金电阻点焊工艺参数见表4.7-68。

表 4.7-68 镁合金电阻点焊工艺参数

δ/mm	电极球面半径/mm	电极压力/kN		焊接时间/s	焊接电流/kA	锻压时间/s
		焊接时	锻压时			
在低频焊机上						
0.8+0.8	75	1.96	3.92	0.06	26	0.08
1.0+1.0	75	2.45	5.88	0.08	28	0.10
1.5+1.5	100	3.43	7.84	0.10	35	0.12
2.0+2.0	100	4.41	9.81	0.14	41	0.16
2.5+2.5	150	5.43	13.73	0.16	43	0.20
3.0+3.0	150	6.38	19.72	0.20	48	0.28
4.0+4.0	150	7.84	25.51	0.24	53	0.32
在交流焊机上						
0.8+0.8	50	2.94	—	—	20	—
1.0+1.0	70	3.92	—	—	24	—
1.5+1.5	100	4.91	—	—	27	—
2.0+2.0	100	6.87	—	—	30	—

不同板厚镁合金点焊时，厚板一侧应采用直径较大的电极。

多层板点焊时焊接电流和电极压力等参数可比两层板点焊时大。

为确认焊接工艺参数是否合适，需焊若干对试样，一般用两块镁合金板点焊成十字形搭接试样，然后作拉断试验，检查焊点气孔、裂纹等缺陷，如果没有任何缺陷，再焊接抗剪试样，检验抗剪强度值。

检查焊点焊透深度的方法可用金相宏观检验法。

4）点焊接头组织 2 mm厚AM50镁合金的点焊接头由4个区组成：熔化区、热影响区、熔体延伸区和压延区，见图4.7-51。焊核尺寸、形状和组织取决于合金成分、热输入量、母材中的偏析和气孔。同样点焊条件下，AM50镁合金焊核形状为圆形，AZ91镁合金焊核形状为四方形，压痕区的尺寸AM50镁合金比AZ91镁合金的小。热输入量增加，焊核尺寸增加。镁合金母材晶间存在低熔点偏析，加热时晶界会熔化和再结晶。

2.4 镁及镁合金的钎焊

镁合金的钎焊技术和铝合金相似。采用火焰钎焊，炉中



钎焊和浸渍钎焊，以浸渍钎焊应用最广泛。钎料用镁基钎料，一般采用 Mg-Al-Zn 钎料（Al12%、Zn0.5%、Be0.005%（质量分数）），钎剂用氯化物和氟化物混合粉末。

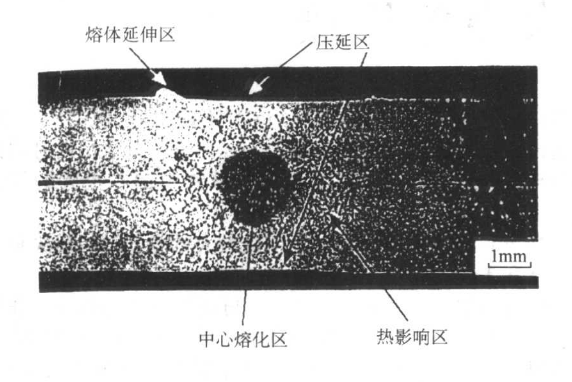


图 4.7-51 镁合金点焊接头组织

火焰钎焊使用氧－燃气或空气－燃气。天然气温度低，可避免过热。加热前，钎料放在接头处，涂上钎剂，因基体金属固相线温度与钎料流动温度接近，难以用手工方式加钎料。

炉中钎焊时，钎料预先放在接头上，接头间隙为0.10～0.25 mm，沿接头喷撒干粉钎剂（用水或酒精调配的钎剂膏会妨碍钎料流布，不宜使用）。

炉中钎焊需严格控制钎焊温度，以保证基体金属的过烧能减至最低程度，预防镁燃烧，钎焊时间应使钎料完全流布的最短时间，以防钎料过分扩散和镁燃烧，钎焊温度下保温1～2 min完成钎焊过程。随工件厚度和定位夹具不同，可适当延长或缩短保温时间。钎焊后将零件在空气中自然冷却，不强迫通风，以免变形。

浸渍钎焊时钎剂熔池体积大，加热均匀，浸渍钎焊质量优于其他钎焊方法，应用较多。

镁合金浸渍钎剂具有加热和钎剂化双重作用，接头间隙为0.10～0.25 mm，钎料预先放置好，用不锈钢夹具组装好部件。在炉中预热450～480℃，驱除湿气，防止热冲击。钎剂浴中零件加热很快，1.6 mm厚的基体金属浸渍时间约为30～45 s，带夹具的大型组件，浸渍时间约需1～3 min。

2.5 镁及镁合金的搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊适合于镁合金焊接。镁合金搅拌摩擦焊焊接温度低，焊接变形小，接头上下表面光滑，无余高，无焊接裂纹和焊缝气孔等缺陷。

镁合金搅拌摩擦焊焊接原理和焊接铝合金时一样。焊接参数有：搅拌透旋转速度、焊接速度、焊接压力搅拌头几何形状。

镁合金搅拌摩擦焊容易出现的缺陷有：背面未焊透、空洞和表面沟槽。焊接压力较小时，易形成空洞和背面熔合不良（未熔合），焊接压力过大时，表面成形不良。当摩擦热量不足时，接头部位材料塑化流动不充分，不能有效填满空洞，形成表面沟槽。

镁合金搅拌摩擦焊接头组织分为焊核区、热机械影响区、热影响区和母材。MB8镁合金搅拌摩擦焊接头焊核区晶粒细小均匀，发生了动态再结晶；热影响区晶粒粗大，大于母材；热机械影响区位于焊核区和热影响区，晶粒发生变形并显著长大，耐蚀性较差，在金相组织上表现为不连续的黑色区。

MB8镁合金搅拌摩擦焊接头强度系数可达0.76。

2.6 镁及镁合金的螺柱焊

螺柱焊适合于镁合金，焊缝成形和接头质量良好。

采用直流电源，反接，He气保护，焊接参数控制严格，螺柱焊枪准确控制送进，防止飞溅和咬边。把AZ31A镁合金螺柱焊在AZ31B镁合金铸件板上，规范参数见表 4.7-69。

表 4.7-69 镁合金螺柱焊规范参数

螺柱直径 /mm	焊接电流 /A	焊接时间（周期数）	间隙 /mm	顶锻距离 /mm	断裂载荷 /N	保护气体
6.35	125	45	3.18	6.35	6 809	氦气
12.7	375	40	3.18	4.83	18 245	氦气

2.7 镁及镁合金焊接技术安全

镁合金在高温时很容易燃烧，镁粉常常有爆炸的危险，镁合金焊接时会产生有害的黄绿色烟雾，因此，必须加强工作场地的通风措施。

镁合金焊接时一般选用大电流、高焊速，故弧光特别强烈并易造成灼伤，应加强保护。焊接时飞溅出的小颗粒熔滴在空气中燃烧，往往对焊工的头部、颈部造成烫伤。所以在焊接时除配戴焊工面罩外，最好再配戴防尘帽。

镁合金燃烧时禁止用水灭火，因为镁和水会发生作用，生成爆炸性气体——氢气，并放出大量热量，一般可用烘干过的熔剂、干砂、干铸铁粉灭火。

编写：焦好军（航天材料及工艺研究所）



第 8 章　钛及其合金的焊接

1　概述

纯钛是一种银白色金属，882.5℃以下它具有密集六方结构，称为α相。高于此温度，发生同素异构转变，成为体心六方结构，称为β相。β相转变温度受到钛中杂质含量和加入合金元素的影响。

钛与氧的化学亲合力强，甚至在室温下其清洁的表面也会迅速地形成稳定而坚韧的氧化层。这种行为产生自然钝化，因而钛具有良好的耐盐、耐氧化性酸和无机酸腐蚀性能。

在温度高于 649℃时，钛的抗氧化能力急剧下降。纯钛的塑性非常好而抗拉强度较低。固溶体中的氧和氮可以显著提高钛的强度，但塑性明显降低。氢对钛有明显的脆化影响。因此在加工和连接过程中对其必须采取保护措施，以免受到空气的污染和受到氧、氮、氢的作用而脆化。

在高温下，钛还与碳反应生成碳化物。加入碳作为合金元素可以提高强度和硬度。然而碳化物过多会使金属变脆。焊接前必须确保无油、脂或其他碳氢化合物。夹具和用于控制熔融填充金属的挡块不能用石墨制造。

钛焊接中重要的物理性能如表 4.8-1 所列。钛的热膨胀系数和热导率小，因此具有良好的焊接性。

表 4.8-1　钛的物理性能

密度 /g·cm^{-3}	熔点 /℃	线胀系数 /10^{-6}K^{-1}	热导率/W·(m·K)$^{-1}$	电阻率 /μΩ·cm	比热容 /J·(kg·K)$^{-1}$	弹性模量/GPa
4.5 (20℃)	1 688	8.4(20℃)	16(20℃)	42(20℃)	522 (20℃)	117

在退火状态下工业纯钛的抗拉强度为 350 ~ 700 MPa，伸长率为 20% ~ 30%，冷弯角为 80° ~ 130°。纯钛具有良好的低温性能。

工业纯钛强度偏低。为提高强度和改善性能，需加入合金元素。根据元素所要稳定的相和合金化方式，将这些元素列于表 4.8-2 中。当加入的量超过固溶体容许量时，O、N、H、C、Si 与钛形成化合物。

表 4.8-2　钛合金中合金元素的分类

所要稳定的相 / 合金化方式	α相稳定元素	β相稳定元素	中性元素
置换式	Al	Cr、Nb、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni、Pd、Si、Ta、W、V	Sn、Zr、Hf
间隙式	O、N、C	H	

α相的稳定元素在α相中具有最大的固溶度，例如，Al 稳定α相并提高同素异构转变温度。钛合金中 Al 最大不超过 10%，否则会因产生 Ti_3Al 化合物而变脆。β相稳定元素降低同素异构转变温度。采用大量的β相稳定元素时，β相在室温和低于室温下还能保持稳定。C、H、N 和 O 在钛及其合金中都以杂质的形式存在。国家标准规定，钛合金中 w（O）一般不超过 0.20%，w（C）不超过 0.10%，w（N）不超过 0.05%，w（H）不应超过 0.015%。中性元素对同素异构转变温度影响不大，在α钛和β钛中都有很大的固溶度，并起到强化作用。

在所有的钛及其合金中，用量最大的是 TC4，其次是工业纯钛和 TA7。

钛合金的比强度大，又具有较好的韧性和焊接性，在航空航天领域可与铝合金或钢相竞争。军用飞机钛合金结构重量占机体重量的 25%以上，发动机上钛合金重量达到 25%，推重比增加 1 倍左右。Apollo 登月飞船上的压力容器，70%以上用钛合金制造。

钛及钛合金具有良好的耐腐蚀性能，在化工、冶金、电镀、造纸、造船、海水淡化、海洋工程、电站冷凝器等方面获得了成功应用。但是在稀盐酸、稀硫酸等还原性介质中，钛的耐腐蚀性较差。

2　钛合金的分类

我国现行标准按钛合金退火状态的室温平衡组织分为α钛合金、β钛合金和α+β钛合金 3 类，分别用 TA、TB 和 TC 表示。钛及其合金的化学成分如表 4.8-3 所示。常用钛及钛合金室温力学性能如表 4.8-4 所示。

2.1　工业纯钛

工业纯钛根据最低的力学性能和最大的间隙杂质含量来分类。其强度的变化是由杂质含量的不同引起的。工业钝钛在化学领域得到广泛应用。

2.2　α和近α钛合金

α合金不常用热处理来提高强度，其显微组织中α相含量很高。这类合金用于需要中等的高温强度和抗蠕变性能的场合。近α钛合金是为获得突出的蠕变强度和高温稳定性而设计的，其手段是加入少量β稳定元素。

2.3　α+β钛合金

α+β钛合金可用固溶－时效热处理进行强化。其显微组织为α相和β相的混合组织。某些α+β钛合金也在退火状态下使用。这类合金具有极好的断裂韧性，在热处理状态下的比强度非常突出。TC4 是应用最广泛的α+β钛合金。其缺点是淬透性较差，不超过 25 mm。为此发展了高淬透性和强度也略高的 TC10 合金。

2.4　β钛合金

β钛合金含β相稳定元素百分率高，但实际上不是单相。它们向α相的转变非常缓慢，在室温加工过程中其显微组织几乎都是β相。经过长时间、低温度热处理可以大大提高强度。硬化机理是α相或化合物的析出。β钛合金在单相状态下的成形性能极好，这是其常被应用的原因。如经热处理，比强度显著提高，但塑性和断裂韧性较差。β钛合金具有优异的加工硬化性能，常被用作紧固件和弹簧。

TB2 是近年来我国研制的高强钛合金，属于亚稳β钛合金，它的强度高、冷成形性好、焊接性尚可。Ti-33Mo 属于稳定β钛合金，耐腐蚀性非常好。



表 4.8-3　加工钛及钛合金牌号和化学成分（摘自 GB/T 3620—1994）

合金牌号	化学成分组	主要成分（质量分数）/%												杂质（质量分数）/%　≤				
		Ti	Al	Cr	Mo	Sn	Mn	V	Fe	Cu	Si	B	Zr	Fe	C	N	H	O
TAD	碘法钛	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03	0.03	0.01	0.015	0.05
TA1	工业纯钛	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15	0.05	0.03	0.015	0.15
TA2	工业纯钛	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.10	0.05	0.015	0.20
TA3	工业纯钛	余量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.40	0.10	0.05	0.015	0.30
TA4	Ti-3Al	余量	2.0~3.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.10	0.05	0.015	0.15
TA5	Ti-4Al-0.005B	余量	3.3~4.7	—	—	—	—	—	—	—	—	0.005	—	0.30	0.10	0.04	0.015	0.15
TA6	Ti-5Al	余量	4.0~5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.10	0.05	0.015	0.15
TA7	Ti-5Al-2.5Sn	余量	4.0~6.0	—	—	2.0~3.0	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.10	0.05	0.015	0.20
TA9	Ti-0.2Pd	余量	Pd：0.12~0.25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.25	0.10	0.03	0.015	0.20
TA10	Ti-0.3Mo-0.8Ni	余量	—	—	0.2~0.4	—	—	—	Ni：0.6~0.9	—	—	—	—	0.30	0.08	0.03	0.015	0.25
TA11	Ti-8Al-1Mo-1V	余量	7.35~8.35	—	0.75~1.25	—	—	0.75~1.25	—	—	—	—	—	0.30	0.08	0.05	0.015	0.12
TA12	Ti-5.5Al-4Sn-2Zr-1Mo-0.25Si-1Nd	余量	4.8~6.0	—	0.75~1.25	3.7~4.7	—	—	—	—	0.20~0.35	Nd：0.6~1.2	1.5~2.5	0.25	0.10	0.05	0.012	0.15
TA13	Ti-2.5Cu	余量	—	—	—	—	—	—	—	2.0~3.0	—	—	—	0.20	0.08	0.05	0.010	0.20
TA15	Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V	余量	5.5~7.0	—	0.5~2.0	—	—	0.8~2.5	—	—	—	—	1.5~2.5	0.25	0.10	0.05	0.015	0.15
TA18	Ti-3Al-2.5V	余量	2.5~3.5	—	—	—	—	2.0~3.0	—	—	—	—	—	0.30	0.05	0.025	0.015	0.12
TA19	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	余量	5.5~6.5	—	1.8~2.2	1.8~2.2	—	—	—	—	—	—	3.6~4.4	0.25	0.05	0.05	0.012 5	0.15
TB2	Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al	余量	2.5~3.5	7.5~8.5	4.7~5.7	—	—	4.7~5.7	—	—	—	—	—	0.30	0.05	0.04	0.015	0.15
TB3	Ti-10Mo-8V-1Fe-3.5Al	余量	2.7~3.7	—	9.5~11.0	—	—	7.5~8.5	0.8~1.2	—	—	—	—	—	0.05	0.04	0.015	0.15
TB4	Ti-4Al-7Mo-10V-2Fe-1Zr	余量	3.0~4.5	—	6.0~7.8	—	—	9.0~10.5	1.5~2.5	—	—	—	0.5~1.5	—	0.05	0.04	0.015	0.20
TB5	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	余量	2.8~3.6	2.5~3.5	—	2.5~3.5	—	14.0~16.0	—	—	—	—	—	0.25	0.05	0.05	0.015	0.13
TB6	Ti-10V-2Fe-3Al	余量	2.6~3.4	—	—	—	—	9.0~11.0	1.6~2.2	—	—	—	—	Y：0.005	0.05	0.05	0.015	0.13
TC1	Ti-2Al-1.5Mn	余量	1.0~2.5	—	—	—	0.7~2.0	—	—	—	—	—	—	0.30	0.10	0.05	0.012	0.15
TC2	Ti-4Al-1.5Mn	余量	3.5~5.0	—	—	—	0.8~2.0	—	—	—	—	—	—	0.30	0.10	0.05	0.012	0.15
TC4	Ti-6Al-4V	余量	5.5~6.8	—	—	—	—	3.5~4.5	—	—	—	—	—	0.30	0.10	0.05	0.015	0.20
TC6	Ti-6Al-1.5Cr-2.5Mo-0.5Fe-0.3Si	余量	5.5~7.0	0.8~2.3	2.0~3.0	—	—	—	0.2~0.7	—	0.15~0.4	—	—	—	0.10	0.05	0.015	0.15
TC9	Ti-6.5Al-3.5Mo-2.5Sn-0.3Si	余量	5.8~6.8	—	2.8~3.8	1.8~2.8	—	—	—	—	0.2~0.4	—	—	0.40	0.10	0.05	0.015	0.15
TC10	Ti-6Al-6V-2Sn-0.5Cu-0.5Fe	余量	5.5~6.5	—	—	1.5~2.5	—	5.5~6.5	0.35~1.0	0.35~1.0	—	—	—	—	0.10	0.04	0.015	0.18
TC11	Ti-6.5Al-1.5Zr-3.5Mo-0.3Si	余量	5.8~7.0	—	2.8~3.8	—	—	—	—	—	0.20~0.35	—	0.8~2.0	0.25	0.10	0.05	0.012	0.15
TC12	Ti-5Al-4Mo-4Cr-2Zr-2Sn-1Nb	余量	4.5~5.5	3.5~4.5	3.5~4.5	1.5~2.5	—	—	Nb：0.5~1.5	—	—	—	1.5~3.0	0.30	0.10	0.05	0.015	0.20



续表 4.8-3

合金牌号	化学成分组	主要成分（质量分数）/%												杂质（质量分数）/% ≤				
		Ti	Al	Cr	Mo	Sn	Mn	V	Fe	Cu	Si	B	Zr	Fe	C	N	H	O
TC16	Ti-3Al-5Mo-4.5V	余量	2.2~3.8	—	4.5~5.5	—	—	4.0~5.0	—	—	—	—	—	0.25	0.10	0.05	0.012	0.15
TC17	Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	余量	4.5~5.5	3.5~4.5	3.5~4.5	1.6~2.4	—	—	—	—	—	—	1.6~2.4	0.30	0.05	0.05	0.012 5	0.08~0.13

注：原 TB1、TC5、TC8 三个牌号已于 1982 年制订国标时删除，TA8、TC7 于 1994 年修订国标时删除。TC3 合金已经淘汰。TC16 杂质 Zr 含量不大于 0.30%，Si 含量不大于 0.15%。

表 4.8-4 钛及其合金室温力学性能

合金牌号	国外对应牌号	合金类型	热处理状态	抗拉强度/MPa	伸长率/%	冷弯角度/（°）
TA1	Ti-40（美）；BT1-00（俄）；IMI125（英）	工业纯钛	退火	340~390	30	130
TA2	Ti-55（美）；BT1-0（俄）；IMI130（英）	工业纯钛	退火	440~590	25	90
TA3	Ti-70（美）；BT1-1（俄）；IMI155（英）	工业纯钛	退火	540~690	20	80
TA6	BT5（俄）	α	退火	690	12	40
TA9	—	α	退火	420	27	—
TA7	Ti-5Al-2.5Sn（美）；BT5-1（俄）；IMI317（英）；KS115A5（日）	α	退火	740~930	12	40
TA11	Ti-8Al-1Mo-1V（美）	近α	双重退火	928	21.5	—
TA12	IMI829（英）	近α	双重退火	990~1 049	13.0~19.0	—
TA13	IMI230（英）	α	退火	585~640	22~29	—
			固溶、时效	795	22	—
TA15	BT20（俄）；BT20л（俄）	近α	退火	930~1 130	10.7~12.5	—
TA18	Ti-3Al-2.5V（美）	近α	退火	645~691	18~27	—
TA19	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo（美）	近α	退火	1 056~1 100	15.3~18.0	—
TB2	—	β	退火	980	20	—
			固溶、时效	1 320	8	—
TB3	—	β	固溶、时效	1 177~1 373	8~14	24~30
TB5	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al（美）	β	固溶、时效	1 109~1 315	8.5~11	—
TB6	Ti-10V-2Fe-3Al（美）	近β	固溶、时效	1 168	14.4	—
TC1	OT4-1（俄）；IMI315（英）；STA90（日）	近α	退火	590~730	20	60
TC2	OT4（俄）	近α	退火	690	12	50
TC3	BT6C（俄）	α+β	退火	880	10	30
TC4	Ti-6Al-4V（美）；BT6（俄）；IMI318（英）；TiAl6V4（德）	α+β	退火	900	10	30
			固溶、时效	1 080	8	—
TC6	BT3-1（俄）	α+β	等温退火	981~1 177	10~18	—
			固溶、时效	1 275	7~12	—
TC9	—	α+β	—	—	—	—
TC10	Ti-6Al-6V-2Sn（美）	α+β	退火	1 060	8	25
TC11	BT9（俄）	α+β	双重退火	1 066~1 114	16~17.6	—
TC16	BT16（俄）	α+β	退火	835~849	22.8~25.7	—
			固溶、时效	1 030~1 114	14.3~17.3	—
TC17	Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr（美）	α+β	α+β锻造 固溶、时效	1 140~ 1 200	12~17.6	—
			β锻造 固溶、时效	1 217	9.7	—



3 钛及其合金的焊接性

3.1 间隙元素沾污引起脆化

高温下钛与氧、氮、氢反应速度较快，钛在300℃以上快速吸氢，600℃以上快速吸氧，700℃以上快速吸氮。焊接时刚凝固的焊缝金属和高温近缝区，不管是正面还是背面，如果不能受到有效的保护，必将引起塑性下降。液态的熔池和熔滴金属若得不到有效保护，更容易受到空气等杂质的沾污，脆化程度更严重。

1）氧和氮的影响 氧和氮固溶于钛及其合金的焊缝中，使钛晶格畸变，变形抗力增加，导致强度和硬度增加，塑性和韧性降低，并且氮比氧的影响更甚，如图4.8-1所示。图中 R/δ 为板材极限弯曲半径与厚度的比值，是金属薄板塑性的一种表示方法。氩气中杂质含量对工业纯钛焊缝硬度的影响见图4.8-2。有时也可以靠增加焊缝中氧、氮含量提高焊缝金属的耐磨性。其中以氩气中加氮的效果最明显，氩气中 w（N）一般控制在8%~10%为好。

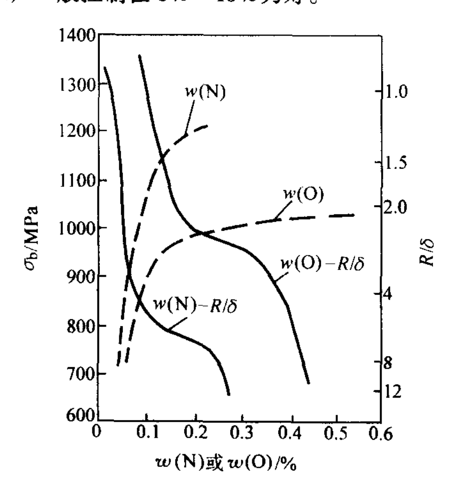


图4.8-1 焊缝氧、氮含量对接头强度和弯曲塑性的影响

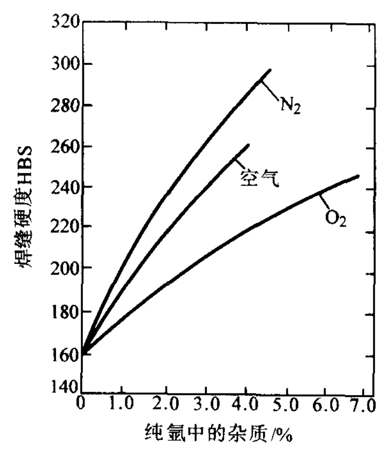


图4.8-2 氩气中氧、氮和空气含量对工业纯钛焊缝硬度的影响

2）氢的影响 氢对工业纯钛焊缝和焊接接头力学性能的影响，如图4.8-3和图4.8-4所示。从图4.8-3可以看出，w（H）从0.010%增加到0.058%，焊缝金属的脆性转变温度大约升高40℃。从图4.8-4可以看出，随氢含量增加，焊缝金属冲击韧度急剧降低，而塑性下降较少，说明是氢化物引起的脆性。

3）碳的影响 常温下碳在α钛中的溶解度为0.13%（质量分数），碳以间隙形式固溶于α钛中，使强度提高、塑

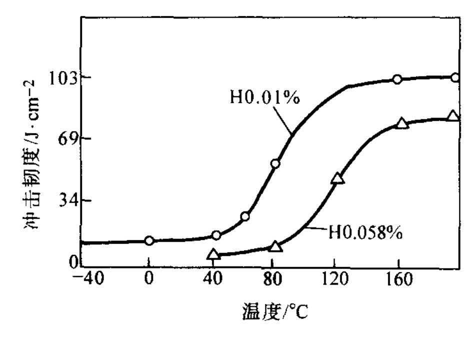


图4.8-3 氢含量和温度对工业纯钛焊缝金属冲击韧度的影响

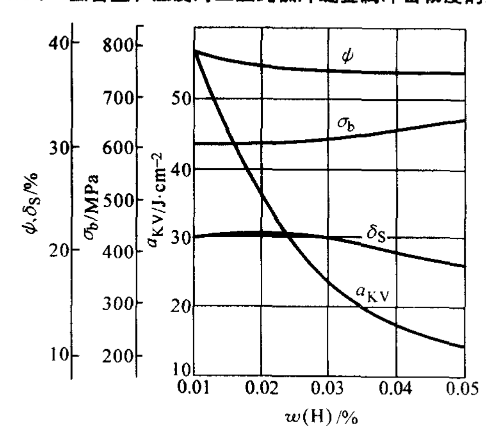


图4.8-4 焊缝氢含量对工业纯钛焊缝金属力学性能的影响

性下降，但作用不及氮、氧显著。碳量超过溶解度时生成硬而脆的TiC，呈网状分布，易于引起裂纹。

气焊和手弧焊均不能满足钛及其合金的焊接质量要求，熔焊时需要惰性气体或真空进行保护，并且焊前需要仔细清理。钎焊一般要在真空或氩气保护下进行。

3.2 焊接相变引起的性能变化

由于钛的熔点高，比热及热导系数小，冷却速度慢，焊接热影响区在高温下停留时间长，使高温β晶粒极易过热粗化，接头塑性降低。

1）工业纯钛 工业纯钛耐腐蚀性、成形性和焊接性好。如果Fe含量高于0.05%，其焊缝在硝酸溶液中特别容易受腐蚀。这是由Fe稳定的残余β相的针状组织的性质引起的。在β相与邻近α相之间存在的原电池腐蚀作用促进焊缝金属的腐蚀。必须采用Fe含量低的填充金属，在焊前准备和焊接过程中都必须排除所有Fe污染源，不能使用钢丝刷清理钛焊件。冷却速度对接头力学性能有较大影响，如图4.8-5所示。冷速以10~200℃/s较好，太快时针状α太多，太慢时过热太甚，都会使塑性降低。

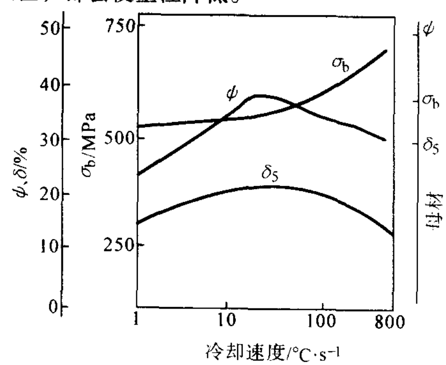
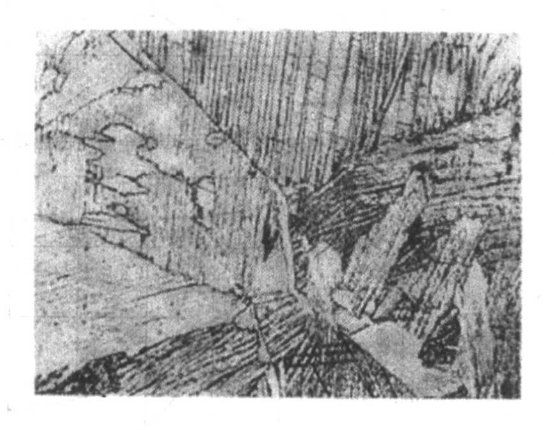


图4.8-5 冷却速度对工业纯钛焊接接头力学性能的影响



2）α和近α钛合金　这类合金焊缝和热影响区为锯齿状α和针状α组织，如图4.8-6所示。焊接或钎焊对退火的α钛合金的力学性能略有影响。Ti－0.2Pd与工业纯钛的焊接性基本相同，但其焊缝金属耐缝隙腐蚀性强。在焊前准备和焊接过程中，对Ti－0.2Pd也应预防铁污染。TA7在低到－251℃仍有高韧性，并适用于低温。为了保持这种性能，必须采用能避免碳、氮和氧污染的方法和工艺进行焊接。近α钛合金的焊接性好，但焊接残余应力可能高，因此推荐对焊件进行消除应力退火。TA7合金焊接接头力学性能如表4.8-5所示，其接头塑性降低的主要原因是：a）焊缝为铸造组织，比轧制状态塑性低；b）粗晶；c）焊接时冷却快，容易产生针状α组织，对接头塑性不利。



(a) 焊缝



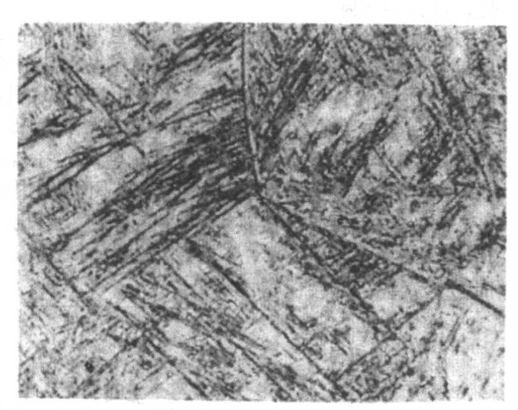
(b) 热影响区

图4.8-6　TA2工业纯钛焊缝和热影响区组织　（×100）

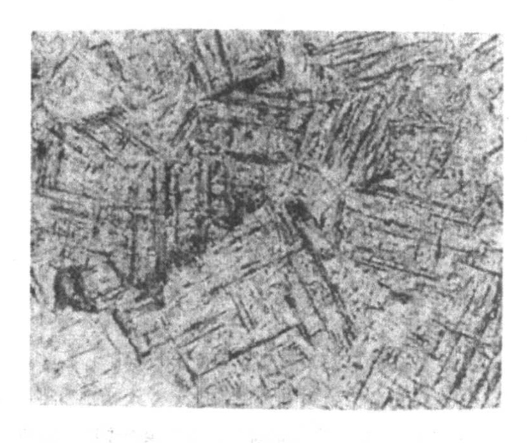
表4.8-5　TA7合金焊接接头力学性能

材料	抗拉强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%	冷弯角/（°）	弯曲半径/板厚
焊接接头	902～921	11～14	25	$\frac{77～80}{77}$	3.3
母材	960	17～18	42	$\frac{80～85}{83}$	2.9

3）α＋β钛合金　这类合金室温平衡组织为α＋β。TC1合金退火状态下β相含量很少，焊接性良好，焊接时冷却速度以12～150℃/s为宜。TC4合金以α相为主，β相较少。加热到β相转变温度（996℃±14℃）以上温度快冷时发生$\beta_0\to\alpha'$，α'为钛过饱和针状马氏体，晶粒粗大的原始β相晶界清晰可见，图4.8-7为TC4合金焊缝和热影响区组织。焊接接头塑性，特别是端面收缩率较低，但断裂韧度较高，一般可提高20%。TC4合金多为退火状态下使用，为提高强度，可淬火状态下焊接，焊后时效。TC4合金退火状态下焊接时接头强度系数可达100%，接头塑性约为母材的50%。TC4合金焊接时合适的冷速为2～40℃/s，比TC1和TA7小得多。这是由于合金化程度高、晶粒长大倾向小，而过大的冷速会使α'更细、更多，塑性降低也多的缘故。根据上述分析可知，TC4合金焊接时可以采用较大的热输入，而不宜采用较少的热输入。



(a) 焊缝



(b) 热影响区

图4.8-7　TC4合金焊缝和热影响区组织（×200）

TC10合金是一种高强度、高淬透性合金，由于合金元素含量较高，焊接性较差，厚12 mm的TC10合金焊接时会出现热影响区裂纹。预热250℃可预防裂纹并能提高接头塑性。

4）β合金　大多数β合金在退火或热处理状态下进行焊接。这些合金在焊接状态下的焊接接头塑性好，但强度较低。由于焊接接头对热处理的反应不同，而且时效后塑性低，所以用于此状态的β合金最多。如果焊缝处于高温下使用，则会发生时效作用。为获得焊接接头的接头效率为100%，这些合金可以在退火状态下进行焊接，然后对焊缝金属采用轻敲或精轧进行冷作，最后对整个焊件进行固溶处理和时效。

β合金又可分为亚稳β合金和稳定β合金两种。亚稳β合金 TB2 平衡组织为β加极少量α相，焊接容易得到亚稳β相，焊后热处理时析出α相，容易引起脆性。TB2 合金抗拉强度可达 1 320 MPa，焊后进行 520～580℃、8 h 时效处理，接头强度可达 1 180 MPa，伸长率可达 7%，而经 500℃、8 h×620℃、0.5 h 时效处理抗拉强度可达 1080 MPa，伸长率可达 13%。

Ti－33Mo 合金其组织为稳定β相，是一种耐腐蚀钛合金。这类合金焊接时无相变，焊接性良好。

5）异种钛合金　可以将工业纯钛与α合金以及与某些α+β合金焊接起来。应采用工业纯钛填充金属。有足够的焊缝余高，对接头可以提供良好的强度性能。如采用非合金钛填充金属焊接合金时应注意一点，即残余氢会从母材扩散到焊缝金属中，在焊缝金属中形成氢化物并导致延期脆断。

6）与其他金属的相容性　采用熔焊能成功地将钛与其他活性金属，如锆、铌、钽和铪焊接起来。除了与锆的焊接外，钛与其他所有活性金属的熔焊时要一致熔化是困难的。钛与这些金属形成连续的固溶体，但焊接接头的塑性差。另一方面，钛与铁、镍、铜和铝普通结构合金形成脆性的金属间化合物，因此采用熔焊焊接这些异种金属时会形成极脆的焊缝。采用扩散作用和合金化作用极小的固态焊接方法，可以将钛与某些金属焊接起来。例如，爆炸焊、摩擦焊和扩散焊。

3.3 裂纹

由于钛及钛合金中 S、P、C 等杂质很少，低熔点共晶很难在晶界出现，有效结晶温度区间窄，加之焊接凝固时收缩量小，因此很少出现焊接热裂纹。

焊接时保护不良或α+β合金中含β稳定元素较多时会出现热应力裂纹和冷裂纹。加强焊接保护，防止有害杂质污染和焊前预热，焊后缓冷可以减少甚至消除热应力裂纹和冷裂纹。

钛合金焊接时，可能出现延迟裂纹，这与氢有关。焊接时由于熔池和低温区母材中的氢向热影响区扩散，引起热影响区氢含量增加，加上此处不利的应力状态，结果会引起裂纹。随焊缝氢含量的增加，形成源于气孔的裂纹时间减少。应在力所能及的条件下降低焊接接头氢含量，例如选用氢含量低的材料（包括焊丝、母材、氩气），注意焊前清理，在可能的条件下，焊后进行真空去氢处理。另外残余应力也起较大作用，应及时进行消除应力处理。

氢化钛会引起裂纹，正常氢含量的钛及其合金焊接时一般不会出现氢化钛。薄壁的α+β钛合金用工业纯钛作填充材料时也不会出现氢化钛。厚板α+β钛合金多层焊时，若用工业纯钛作填充材料则可能出现氢化钛并引起氢脆。

3.4 气孔

气孔是钛及钛合金焊接时最常见的焊接缺陷。气孔可分为焊缝中部气孔和熔合线气孔。焊接热输入较大时，气孔一般位于熔合线附近；焊接热输入较小时，气孔则位于焊缝中部。气孔的影响主要在于降低焊接接头疲劳强度，能使疲劳强度降低一半甚至四分之三。

在一般情况下，金属中溶解的氢不是产生气孔的主要原因。焊丝和坡口表面的清洁度是影响气孔的最主要因素。在拉丝时黏附在焊丝表面的润滑剂是引起气孔的重要原因。可以采用沾有溶剂的无棉布擦拭清除润滑剂。打磨时残留在坡口表面的磨粒、清洗时橡胶手套以乙醇溶解的增塑剂、以及擦拭坡口时的残留物都会引起气孔。薄板剪切时形成的粗糙的端面容易受到形成气孔物质的沾污，去掉毛刺和减少表面粗糙度可以大大减少这种沾污，从而可减少气孔。

焊接方法不同，气孔敏感性也不同。在氩弧焊、等离子弧焊和电子束焊三种焊接方法中，电子束气孔最多，等离子弧焊最少。

焊接工艺参数对气孔的影响有时是矛盾的。降低焊接速度有时会增加气孔，有时则可减少气孔。有时慢冷可减少气孔，但有时快冷也可减少气孔。这主要是由于熔池停留时间增加使气泡浮出和周围气体扩散促使气泡长大这两个过程同时存在并影响气孔的产生所致。

3.5 相对焊接性

根据钛合金获得韧性和塑性焊缝的能力来评价钛合金的焊接性。表 4.8-6 给出了钛合金焊接性的评价。

表 4.8-6 钛合金的相对焊接性

合　金	焊接性的评价①
工业纯钛	A
α合金	
Ti－0.2Pd	A
TA7（Ti－5Al－2.5Sn）	B
TA7（Ti－5Al－2.5Sn）（间隙元素含量极低）	A
α+β合金	
TC1	B
TC3	B
TC4	B
TC4（杂质元素很低）	A
TC6	C
TC10	C
β合金	
TB2	B

① A—焊接性优良；B—焊接性尚可；C—焊接性较差，限于特种场合应用。

定为 A 和 B 级的合金，可用于多数焊接结构；定为 C 级的合金，可采用退火热处理改善接头韧、塑性。为提高强度，TC4、TC10 合金焊前要进行淬火处理。

4 焊接材料和工艺

4.1 焊接材料

1）填充金属　一般来说，钛及钛合金焊接时，填充金属与母材的标称成分相同。为改善接头的韧、塑性，有时采用强度低于母材的填充金属，例如用工业纯钛（TA1、TA2，不用 TA3）作填充金属焊接 TA7 和厚度不大的 TC4，用 TC3 焊 TC4。为改善焊缝金属的韧、塑性，填充金属的间隙元素含量较低，一般只有母材的一半左右。填充丝直径 1～3 mm。因为具有较大的表面积/体积比，如果焊丝表面稍有污染，焊缝可能被严重污染。焊丝缺陷如裂纹、皱折等会聚集污染物，又难于清理，故这种焊丝不能应用。

2）保护气体　一般采用氩气，只有在深熔焊和仰焊位置焊接时，有时才用氦气，前者为增加熔深，后者为改善保护。为保证保护效果，一般采用一级纯氩（ψ（Ar）≥99.99%），其露点低于－60℃。由于橡皮软管会吸气，一般不采用，多用环氧基或乙烯基塑料软管输送保护气体。

4.2 焊前清理

在焊接和钎焊前，钛零件必须清除表面污染物并进行干



燥。对于油污、指纹印痕、油脂、油漆和其他杂质可以采用合适的溶剂清洗方法进行清除。

需要焊接或钎焊的钛零件，如果在接头附近有薄的氧化膜，则可以在氢氟酸2%～4%和硝酸30%～40%的水溶液中进行酸洗清除，使用各种酸，尤其是氢氟酸时，应采取安全防护措施。随后采用合适的水进行冲洗并进行干燥。清洗浴槽温度低于60℃时，钛合金吸附氢一般不成为问题。当存在应力腐蚀危险时，不能用自来水冲洗，而用不含氯离子的清水冲洗。在向焊接或钎焊夹具中装配钛零件时必须戴无棉手套。

在600℃以上形成的氧化皮很难用化学方法清除，可用不锈钢丝刷或锉刀清理，也可用喷丸或蒸汽喷砂进行清除。经过机械方法清理后，一般接着进行酸洗，以确保完全清除掉氧化皮和表面上任何受污染的金属。

为控制焊接气孔，在装配和最终清洗以前应对需要焊接的板边及其邻近表面进行特殊的处理，包括锉、钢丝刷刷或磨光。

若焊接前需要延长零件储存时间，可将这些零件存放在有干燥剂的容器中或放在湿度可控的储存室中。如果不可能这样做时，推荐在即将焊接或钎焊以前将这些零件彻底清除油脂和进行轻微酸洗。机械磨光待焊表面并随后以适当溶剂清洗，有时可取代酸洗处理。在装夹零件以前，对焊接夹具本身也需要进行彻底的清理和清除油脂。

4.3 焊接或钎焊中的保护

由于钛对氧、氮、氢有脆化的敏感性，因此对整个焊件或对于受热温度约高于260℃的部分必须加以防护，以免受到大气污染。在大气中或操作室中采用高纯度的惰性气体罩或采用压力为 1.33×10^{-2} Pa 或稍低的真空，可以提供这种保护作用。

电弧焊过程中，必须对钛进行保护直到它冷却到低于427℃为止。在大气中焊接时采用辅助惰性气体保护装置可以提供合适的保护。在重要的应用场合，必须在气密的操作室中焊接，在事先抽出空气，然后充入高纯度氩气、氦气或其混合气体。必须检测焊接处的气体或从焊接操作室中抽出的气体的露点，保护气体的露点 -29℃大约就是最大水分含量极限。焊接用气体的露点为 -54℃或更低。

常常根据钛材上焊道金属的颜色来确定污染的程度或保护气体的纯度。浅青铜色表明有少量表面污染，而天蓝色表明有较大量的表面污染。焊道金属上有白色薄层表明污染严重。由于受污染的焊缝金属多半是脆的，因此必须将其清除掉。

钎焊或扩散焊钛材时，必须用高纯度惰性气体保护或在真空中焊接。在实施中到达工艺温度后的时间应尽量短，这是因为热的钛会吸收氧、氮，并通过扩散而吸收系统中存在的微量的氢。

4.4 钨极气体保护电弧焊

4.4.1 焊接工艺

分为敞开式焊接和箱内焊接，它们又各自分为手工焊和自动焊。

敞开式焊接主要注意下述三方面能得到惰性气体的有效保护：①熔池及其邻近的母材（主保护）；②高温、已凝固的焊缝金属和热影响区（辅助保护）；③焊接接头的背面（背面保护）。

主保护由焊炬的喷嘴提供保护气。喷嘴结构和尺寸对焊接质量影响很大。喷嘴的尺寸范围通常为13～19 mm，应采用与可达性和可观察性相协调的最大的喷嘴。对喷嘴的要求是能提供层流保护气体，避免出现紊流使周围空气混入保护气中。为提高保护效果，可采用双层气流保护的焊炬。

最普通的辅助保护形式是后拖拖罩保护。其典型结构如图4.8-8所示，氩气由进气管进入分布管、分布管靠近进气管的一侧钻有直径0.8～1.0 mm小孔，孔距10 mm左右，氩气经不锈钢网或多孔板进入保护区，多孔板厚0.8～1.0 mm，孔径1.0 mm，孔距8～10 mm。不锈钢网或多孔板起到类似气筛作用。网或多孔板到焊件的距离10～20 mm，以保证保护效果。拖罩宽25～60 mm，手工焊拖罩长40～100 mm，为便于操作，喷嘴和拖罩可做成一体，自动焊拖罩长60～200 mm，视焊件厚度而定，薄的焊件拖罩短些，厚的焊件则要长些。直缝用平拖罩，环缝用弧形拖罩。

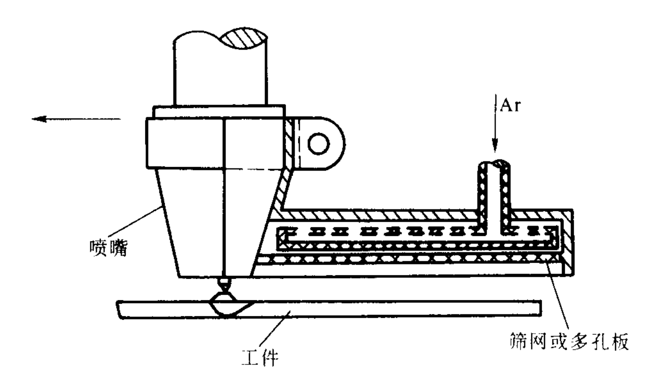


图4.8-8 焊接拖罩结构示意图

背面保护通常是借助临时垫板（或垫环）中气体通道来完成的。常常将通气垫板与焊接夹具结合在一起，位于接头下面开有凹槽，焊接前充入惰性气体将空气排出。为加强冷却可采用纯铜背面垫板，垫板有凹槽，槽深2 mm左右，宽3～8 mm，视板厚而定。槽下有通气孔，孔径1.0 mm，孔距10 mm。

结构复杂的焊件由于难以实现良好的保护，宜在箱内焊接。采用的操作室有两种类型：气流驱气和真空驱气。在气流驱气的操作室中，惰性气体气流穿过操作室以彻底吹走室内的空气而使操作室获得焊接气氛。为获得操作室内足够纯度的焊接气氛，需要惰性气体的用量大约为操作室容量的5～10倍。

如果在焊接过程中必须使钛完全避免污染，最好在真空驱气的操作室中进行焊接。采用这种设备时，用真空泵装置抽走室内的空气，使室内压力下降到 1.3×10^{-2} Pa 或稍低。然后向该室充入纯度合适的惰性气体。该室必须装备自动输送气体系统，在焊接过程中该系统总是使室内保持正压并能借助排气使过高的压力下降。惰性气体不流过焊炬，因此焊炬必须采用水冷结构。

钨极气体保护电弧焊主要用于焊接厚度小于3.2 mm的板材，常用直流正接。推荐采用引弧板或高频电源的引弧方法。

典型焊接坡口设计如表4.8-7所示，推荐的焊接参数列于表4.8-8和表4.8-9。对接坡口留间隙0.2～0.5 mm可明显减少气孔。焊丝从熔池上方一定高度导入，使熔滴经电弧区净化去气，也可明显减少气孔，但对焊缝成形有不利影响。

为减少焊接接头过热产生粗晶，提高接头塑性，减少焊接变形和降低装配精度要求，可以采用脉冲焊。脉冲频率一般为2～5 Hz。用此工艺，板厚0.5 mm时，变形可减少30%，板厚2.0 mm时，变形可减少15%左右，通断比为1:1时，还可明显减少气孔。

在对接端面上涂无氧熔剂，如 $AlCl_3$、$MnCl_2$ 或 CaF_2，熔剂涂敷数量一般为1 mg/cm^2，可减少熔宽、增加熔深，并可明显减少气孔，但焊缝成形较差。



表 4.8-7　钛及钛合金焊接坡口设计

名称	接头形式	母材厚度 δ/mm	间隙/mm 手工焊	间隙/mm 自动焊
无坡口对接		≤1.5 1.6～2.0	b＝(0%～30%)δ b＝0～0.5	b＝(0%～30%)δ
单面 V 形坡口对接		2.5～6.0	b＝0～0.5 P＝0.5～1.0	P＝1～2 b＝0
X 形坡口		6～38	b＝0～0.5 P＝0.5～1.0	b＝0～0.5 P＝1～2
卷边接		＜1.2	a＝(1.0～2.5)δ R 按图纸	—
T 形焊		≥0.5	b:贴合良好 局部允许 1δ	—
无坡口角接		≤1.5 1.6～2.0	b＝(0%～30%)δ b＝0～0.5	—
V 形坡口角接		2.0～3.0	b＝0～0.5 P＝0.5～1.0	—
搭接		0.5～1.5 1.6～3.0	b＝0～0.3 b＝0～0.5	—

表 4.8-8　自动钨极氩弧焊焊接参数

母材厚度/mm	焊丝直径/mm	钨极直径/mm	电流强度/A	电弧电压/V	焊接速度/m·min⁻¹	送丝速度/L·min⁻¹	氩气流量/L·min⁻¹ 正面	背面	拖罩
0.5	—	1.5	25～40	8～10	0.20～0.50	—	8～15	2～5	10～15
0.8			45～55						
1.0			50～65						
1.5		2.0	90～120	10～12	0.15～0.40		10～15	3～6	12～18
1.0	1.0～1.6	1.5	70～80	10～14	0.20～0.45	0.25～0.50	8～12	2～4	10～15
1.2	1.6	1.5	80～100						
1.5	1.6	2.0	110～140				10～15	3～6	12～18
2.0	1.6～2.0	2.5	150～190			0.25～0.60			
2.5	1.6～2.0	3.0	180～250		0.15～0.40	0.30～0.75			

表 4.8-9　手工钨极氩弧焊焊接参数

母材厚度/mm	焊丝直径/mm	钨极直径/mm	电流强度/A	电弧电压/V	氩气流量/L·min⁻¹ 正面	背面
0.4	1.6	1.0～1.5	14～20	8～13	11～15	4～6
0.5			18～25			
0.6			20～25			
0.8		1.5	25～40			
1.0			35～45			
1.5			50～80	10～15	10～15	
2.0			60～90			
2.5			90～100			
3.0			110～140			

4.4.2　焊缝力学性能

焊缝的轴向拉伸疲劳试验表明，焊缝疲劳强度显著低于相同成分的母材试件。断裂韧性试验表示出的熔焊焊缝性能中等或优。非合金钛焊缝金属的韧性，由于氢含量高显著降低，这是由于氢在 α 晶粒中形成脆性氢化钛片晶的结果。以 β 稳定元素置换式合金化所强化的钛合金，其焊缝金属的韧性不受氢含量的影响，但氢含量应在正常工业用的限度内。

为比较钛合金板上焊缝的塑性所用的一种普通方法就是递增半径弯曲试验。最小弯曲半径为一条焊缝不产生裂纹条件下能弯曲到的最小半径，以板材厚度（δ）表示。几种合金的焊缝的典型最小半径如表 4.8-10 所示。

表 4.8-10　钛合金焊态接头的典型最小弯曲半径

合　金	最小弯曲半径（δ）①
工业纯钛	3～5
TA7	4～5
TA7（间隙元素含量极低）	4～5
TC4	8～12
TC4（间隙元素含量极低）	8～10

① δ 为母材的厚度

4.5　熔化极气体保护电弧焊

此法熔敷速度较高，用于中厚度产品焊接，可减少焊接层数、提高生产率、降低成本。此法的主要缺点是熔滴颗粒细、经受的温度高，在电弧气氛中受杂质污染的敏感性大。飞溅问题也比较突出，影响焊缝成形和焊接保护。

由于焊接速度较快，焊道较宽而且冷却较慢，所采用的拖罩必须比钨极氩弧焊的拖罩长的多，必要时拖罩采用水冷。

焊丝必须无脏物、油污、油脂、拔丝润滑剂和能裹住杂质的表面缺陷。已经清理过的焊丝必须在干净条件下储存。

不推荐采用粗滴过渡，因为其飞溅过大和在焊缝中产生未熔合。短路过渡适于较薄件焊接，喷射过渡则适于较厚件焊接。脉冲喷射过渡适于较薄的板和平焊以外的各种位置的焊接。

短路过渡的对接接头，其坡口角度和根部间隙应比用于喷射过渡的大。V 形坡口焊缝推荐采用 90°的坡口角度。

4.6　等离子弧焊

与钨极气体保护电弧焊相比，等离子弧从压缩喷嘴加强后喷出，因此具有能量集中、单面焊双面成形、弧长变化对

熔透程度影响小、无钨夹杂、气孔少和接头性能好等优点，非常适于钛及钛合金的焊接。通常采用恒流焊接电源、直流正接的转移弧进行焊接。

可以采用熔透型和小孔型两种等离子弧焊法。熔透型等离子弧焊法与钨极气体保护电弧焊相似，一次焊透的厚度较小，3 mm以上一般需要开坡口，填丝焊多层。对厚度为1.6～15 mm的钛合金I形对接接头可以采用单道或双道（每面一道）小孔型等离子弧焊法焊接。另一种设计是采用钝边为6～8 mm的V形或U形坡口，用不添加填充金属的小孔型等离子弧焊封底，然后埋弧焊、钨极气体保护电弧焊或熔透型等离子弧焊填满坡口。

小孔型等离子弧焊时，高温等离子焰流过小孔，为保证小孔的稳定，不能使用氩弧焊的背面垫板，背面沟槽尺寸要大大增加，一般取宽、深各20～30 mm即可，背面保护气流量也要增加。等离子弧焊接典型工艺参数如表4.8-11所示。

表4.8-11　钛材等离子弧焊接典型工艺参数

厚度/mm	喷嘴直径/mm	电流强度/A	电弧电压/V	焊接速度/m·min⁻¹	送丝速度/m·min⁻¹	焊丝直径/mm	氩气流量/L·min⁻¹			
							离子气	保护气	拖罩	背面
0.2	0.8	5	—	7.5	—	—	0.25	10	—	2
0.4	0.8	6	—	7.5	—	—	0.25	10	—	2
1	1.5	35	18	12	—	—	0.5	12	15	2
3	3.5	150	24	23	60	1.5	4	15	20	6
6	3.5	160	30	18	68	1.5	7	20	25	15
8	3.5	172	30	18	72	1.5	7	20	25	15
10	3.5	250	25	9	46	1.5	7	20	25	15

TC4合金钨极氩弧焊和等离子弧焊接接头性能如表4.8-12所示。

表4.8-12　TC4合金焊接接头力学性能

材　料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%	冷弯角/(°)
等离子弧焊接头	1 005	954	6.9	21.8	13.2
氩弧焊接头	1 006	957	5.9	14.6	6.5
母材①	1 072	983	11.2	27.3	16.9

①　母材 w(O)＝0.11%。

4.7　真空电子束焊

真空电子束焊非常适用于钛及其合金的焊接。这主要因为它具有一系列的优点：焊接冶金质量好、焊缝窄、深宽比大、焊缝角变形小、焊缝及热影响区晶粒细、接头性能好，焊缝和热影响区不会被空气污染、焊接厚件时效率高等。其缺点是焊缝向母材过渡不平滑，容易出现气孔等。为改善焊缝向母材的过渡可焊2道，第一道为高功率密度的深熔焊，第二道为低功率密度的修饰焊，这可大幅度提高接头疲劳性能。电子束摆动可改善焊缝成形、细化晶粒和减少气孔，接头性能也随之提高。有时背面加垫板，用以预防未焊透或成形不良带来的不利影响。典型的钛及其合金真空电子束焊工艺参数如表4.8-13所示。

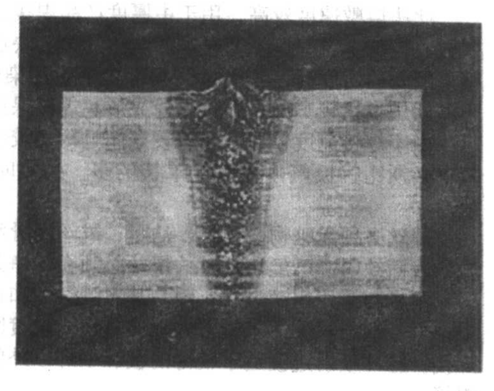
表4.8-13　钛材真空电子束焊工艺参数

材料厚度/mm	加速电压/kV	焊接束流/mA	焊接速度/m·min⁻¹
1.0	13	50	2.1
2.0	18.5	90	1.9
3.2	20	95	0.8
5	28	170	2.5
16	30	260	1.5
25	40	350	1.3
50	45	450	0.7

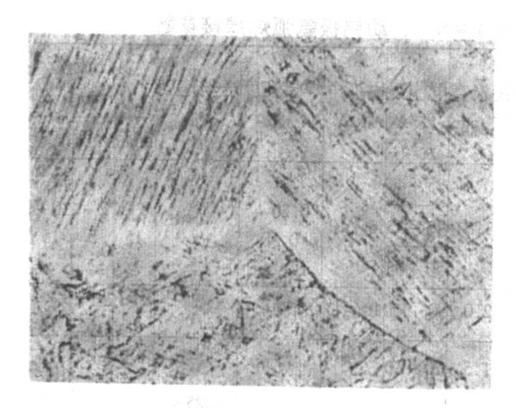
钛合金电子束焊缝的力学性能如表4.8-14所示。电子束焊缝的焊态显微组织和微量偏析对其焊态和焊后热处理的力学性能都有影响。在α-β合金中，马氏体是焊缝显微组织主要组分，与母材相比，焊缝金属和热影响区的屈服强度较高而塑性较低，这是时效产生的直接结果。初始组织和马氏体组分的时效动力学决定了焊后热处理后的力学性能。图4.8-9为TC4合金真空电子束焊缝组织。

表4.8-14　钛合金电子束焊缝力学性能

合金	厚度/mm	试件种类	热处理	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%	断裂韧度/MPa·m^{1/2}
TC4	25.4	母材	轧制退火	1 027	971	14	22	110
		焊缝	705℃，5 h	1 020	951	14	20	62.7
	50.8	母材	轧制退火	937	868	9	10	116.6
		焊缝	750℃，5 h	916	868	10	18	91.3
TC10	6.4	母材	轧制退火	1 109	1 054	13	—	48.4
		焊缝	无	1 206	1 089	3.5	—	48.4
		焊缝	760℃，5 h	1 096	1 013	12	—	62.7



(a) 低倍组织　(×2)



(b) 显微组织　(×200)

图4.8-9　TC4合金真空电子束焊缝组织

亚稳β合金的焊缝金属和热影响区由单相β和某些ω相组成。在这些合金中，焊缝金属凝固偏析会使焊后时效时在焊缝中心线产生很差的性能。这类合金常常在固溶处理状态下焊接，并在焊后直接进行时效。

电子束焊比较适合于钛合金与难熔金属之间的连接。例如，钛合金和铌合金焊接时，为了补偿两种金属的物理性能



差别，在电子束对准焊缝后，可以用自动程序使电子束偏向铌合金一定距离，并使用一定形式和频率的扫描函数，造成合适的能量输入，保证焊缝金属均匀熔化。

4.8　激光焊

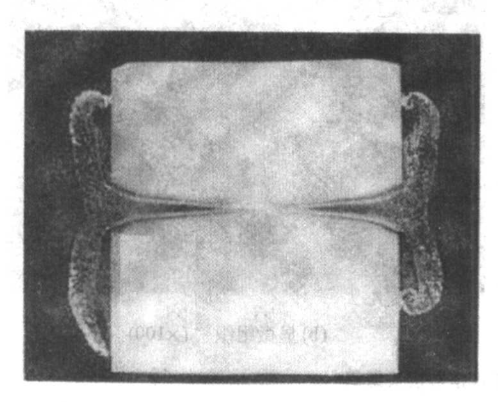
激光焊时的能量密度与电子束焊相当，但激光束通过大气时扩散范围比电子束小得多，故能在大气中焊接。为防止空气污染，焊缝正面和背面要用惰性气体保护。采用高能密度焊接时，熔池上方金属蒸气的电离作用会使激光束扩散并妨碍焊接，用惰性气体（最好是氦）吹散熔池上方的金属离子云可防止这种情况出现。

与电子束焊一样，可以采用熔透技术和小孔技术进行焊接。采用小孔技术时，激光能量吸收率可达90%，采用熔透技术时，能量吸收率大大下降。采用15 kW激光焊，TC4合金单道焊最大厚度可达15 mm。TC4合金接头组织和力学性能与电子束焊类似。其焊接缺陷及预防措施也与电子束焊相似。

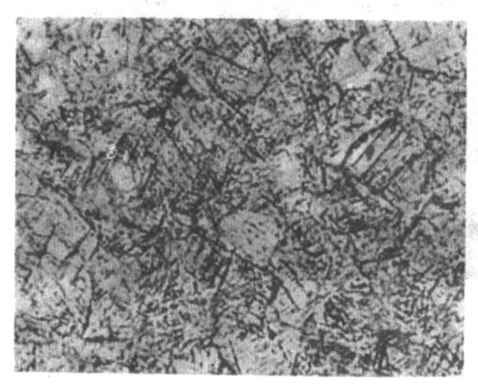
4.9　摩擦焊

钛及其合金摩擦焊没有特殊困难。为了获得良好的摩擦焊焊缝，最基本的要求是，迅速地将接头表面加热到顶锻温度，并立即施加顶锻压力，使连接面产生紧密接触并从连接面挤出金属。惯性摩擦焊从连接面开始接触到转动停止的时间间隔从不足1 s到4 s，线速度从250 m/min到630 m/min，压力从60 MPa到100 MPa。与合金钢和镍基高温合金相比，钛合金摩擦焊速度较高，而顶锻压力较低。

钛合金摩擦焊焊缝为细晶，无熔焊时常出现的冶金不均匀性，因此容易获得100%的抗拉接头效率。图4.8-10为TC4合金摩擦焊接头组织。接头力学性能如表4.8-15所示。多数钛合金摩擦焊焊缝在焊态使用。如果焊缝经消除应力或固溶并时效处理，可获得较好的拉伸性能和疲劳性能。普通退火明显提高TC4合金摩擦焊接头的断裂韧度，并且对接头强度影响不大。



(a) 低倍组织　(×2)



(b) 显微组织　(×300)

图4.8-10　TC4合金摩擦焊接头组织

表4.8-15　钛合金惯性摩擦焊接头力学性能

合金	试件种类	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
TC4	母材	999	923	15	33
	焊接接头	951	848	13	32
TC10	母材	1 247	1 212	17	51
	焊接接头	1 267	1 219	10	25

4.10　电阻焊

① 表面处理　电阻点焊和缝焊依靠两工件接触面之间的接触电阻发热产生焊接热量。接触面的粗糙度和清洁度应当均匀一致，避免因接触电阻不均匀引起焊缝质量的差异。表面氧化物必须清除，否则它会分解使熔核脆化。可用机械的或化学的处理以降低表面电阻。采用不锈钢钢丝刷清理可以为电阻焊提供合适的表面（约100 μΩ），对大型部件采用化学清洗最有效。采用3%～5% HF＋35% HNO_3 水溶液酸洗，可以使接触电阻小于50 μΩ。酸洗到焊接时间不超过48 h，并要保存在洁净、干燥的环境中。对于经化学清洗的钛，应戴上干净的无棉手套才能搬运。

② 电极　钛及其合金高温硬度比不锈钢大，采用硬度高、耐磨性好的镉铜、铬锆铜或铍钴铜合金更合适。钛合金焊接对电极压力变化和电极形状的敏感性较小。点焊推荐采用球面电极，缝焊采用半径相同的弧形面滚轮电极。

③ 保护气体　钛及其合金电阻点焊不需要惰性气体保护，这是因为加热以前接触面已在压力下紧密接触，熔核金属不会暴露在大气中，而且焊接时间短，少于0.2 s，冷却速度又非常快。缝焊，尤其是软规范缝焊时，推荐采用拖罩保护。

④ 工艺参数　钛及其合金杂质少，有效结晶温度区间窄，电阻焊时一般不会出现焊核裂纹。它们的高温塑性好，焊接时焊核周围的塑性环密封性比钢和铝好，即使采用强规范也不易产生金属飞溅。由于钛的电导率和热导率较低，就所需功率来说，其电阻点焊比许多碳钢和低合金钢容易。从冶金方面看，钛合金电阻焊气孔、热裂纹和冷裂纹倾向低。

表4.8-16为钛及其合金、铝合金和不锈钢的热物理性能。从该表可知，纯钛和不锈钢1Cr18Ni9Ti的热导率和电阻系数相近，因此纯钛电阻焊可以采用焊接不锈钢的工艺参数。而钛合金导热性差、电阻系数又大，焊接时产生的热量多且不易散失，因此焊接电流要比不锈钢小20%～30%。焊接工艺参数如表4.8-17所示。

表4.8-16　钛、钛合金、铝合金和不锈钢的热物理性能

材料	密度/$g\cdot cm^{-3}$	线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	热导率/$W\cdot(m\cdot K)^{-1}$	电阻系数/$\mu\Omega\cdot cm$
1Cr18Ni9Ti	7.9	16.6	16.3	75
工业纯钛	4.5	8.4	16.3	42
TA7	4.42	8.5	8.8	138
TC1	4.55	8.0	10.2	—
TC4	4.44	9.1	6.8	160
LD7	2.8	19.6	142.4	5.5

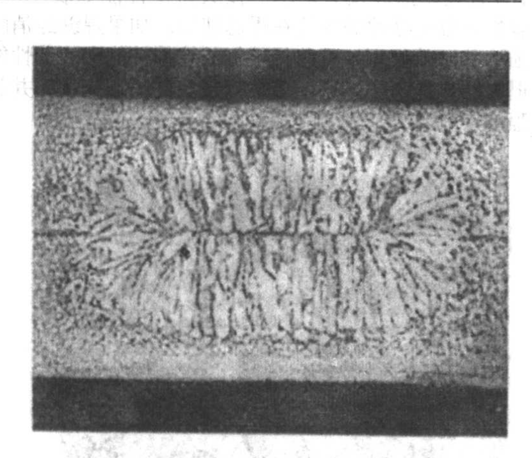
表 4.8-17 钛合金电阻点焊工艺参数

材料	厚度/mm	焊接电流/kA	焊接时间/s	焊接压力/N	电极端面半径/mm
TA7	1.5+1.5	10	0.18	6 860	75
TA7	2.5+2.5	12	0.30	6 860	75
TC4	0.8+0.8	5.5	0.12	2 650	75
TC4	1.5+1.5	10.6	0.18	6 860	75
TC4	0.5+1.5	6~8	0.14	1 760	100
TC4	1.0+1.5	8~9	0.18	2 650	100

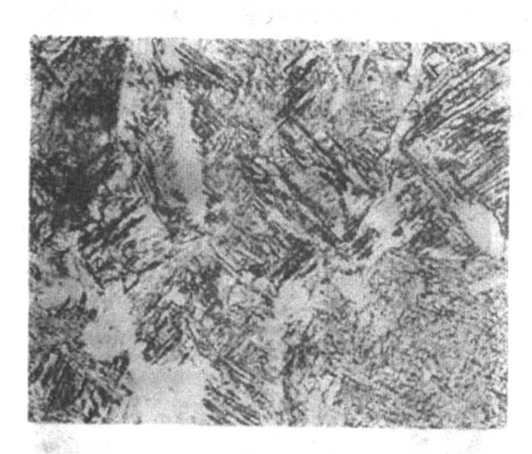
工业纯钛的熔核为等轴晶粒组织，钛合金的熔核为柱状晶粒组织，图 4.8-11 给出了 TA7 合金点焊搭接接头组织。

4.11 闪光焊

钛及其合金闪光焊顶锻压力比焊接钢低，一般采用小到中等的顶锻压力（48~138 MPa）。为减少焊缝的污染，应采用快的闪光速度和短的闪光时间。建议采用抛物线闪光曲线，以减少金属损失并获得最大接头效率。焊接时最好附加氩气保护，对于管件或空心部件，焊接前应用惰性气体置换其内部的空气。钛及其合金闪光焊接头设计与其他金属相似，6.4 mm 以下板材和薄板，应采用平端面，对于较厚的板材，可在端面略微加工斜边。



(a) 低倍组织 (×10)



(b) 显微组织 (×100)

图 4.8-11 TA7 合金点焊搭接接头组织

钛及其合金闪光焊缝晶粒细，塑性好，力学性能接近母材，静态和疲劳性能良好。多数拉伸试件断于焊缝的连接面之外，强度约与母材等强。疲劳试验断裂于焊缝的概率高于拉伸试验，但不算高。

闪光焊已用于 TC4 合金框焊接，断面为角材，50 mm×50 mm，厚 5 mm，先热变形成半圆，然后将两半圆闪光焊成圆框。

4.12 高频焊

用于管材和型材焊接，焊接时内外表面需用氩气保护，以防空气沾污。此法的优点是生产率高，焊接质量好，成本比无缝管低 20% 左右。用此法我国已能生产直径 20~62 mm、厚 2.5 mm 的钛管，焊接速度为 5~6 m/min。焊后外飞边机械加工掉。此工艺的缺点是内飞边难以去除。另外设备一次投资较大，需 200~500 kW、250~450 kHz 的高频电源和成型设备。

4.13 扩散焊和扩散钎焊

钛及其合金采用扩散焊和扩散钎焊容易进行连接。钛的扩散焊焊缝看不出连接面的金相组织痕迹。扩散钎焊时金相组织显示出钎料扩散到母材中。对某些应用场合，扩散焊和扩散钎焊的接头性能比熔焊接头好。与熔焊相比，扩散焊和扩散钎焊还有其他优点：空气污染少，焊件几乎没有变形，节省材料，焊缝的耐腐蚀性能与母材相当。

与熔焊相比，扩散焊和扩散钎焊中待焊表面的清洁度更为重要，必须清除氧化物、有机物和其他任何污染物。待焊表面必须平整光滑，以便使连接面容易获得紧密而均匀的接触。

1）扩散焊　钛及其合金扩散焊一般在真空或氩气保护下进行。对于工业纯钛，在真空中，871℃和 6.89 MPa 的压力下，由于金属蠕动填入连接面的孔穴，10 min 内连接面约有96%达到紧密接触。适合于钛合金的扩散焊的压力从 2 MPa到 30 MPa，焊接温度低时用较大压力，焊接温度高时用较小压力。在某些应用中，需要控制焊件的总变形和变形率，而不是控制压力本身。在不损伤母材性能的条件下焊接温度可选高些。对于 $\alpha+\beta$ 合金而言，焊接温度一般选低于 β 转变温度 40~50℃，例如，TC4 合金 β 转变温度为 996℃，扩散焊温度可选 950℃左右，焊接时间最少为 0.5~1 h，2~6 h 更合乎需要。图 4.8-12 为 TC4 合金真空扩散焊接头组织，它由 $\alpha+\beta+$ 晶界 α 组成，结合面焊合，形成联生晶粒。β 钛合金扩散焊既要保证一定的加热温度，使扩散过程充分进行，又要避免温度过高引起的 β 相晶粒长大。例如，TB2 合金相变温度为 750℃，其扩散焊以 Cu 箔做中间夹层比较理想，推荐规范为温度 850~885℃，时间 30~40 min，压力5~10 MPa，真空度高于 1.33×10^{-2} Pa，所获得接头剪切强度可以达到 171.1 MPa。



图 4.8-12 TC4 合金真空扩散焊接头组织（×100）



钛合金与不锈钢直接扩散焊，会在结合面附近形成一个金属间化合物和碳化物的薄层，导致接头脆断。采用 Ni－Cr 复合中间层的扩散焊所形成的接头极脆，最高强度为 146 MPa。而采用 V＋Cu 复合夹层，可有效防止 Ti 与不锈钢中 Fe、Cr、Ni、C 的相互扩散和迁移，消除了接头中脆性的金属间化合物和碳化物。采用 V＋Cu 复合夹层扩散焊接 TC4 和 1Cr18Ni9Ti，推荐规范：焊接温度 900～950℃，焊接时间 20～30 min，焊接比压力 5～10 MPa。接头抗拉强度达到 347～356 MPa。采用纯 Ni 作中间层扩散焊，接头强度最高达到 358 MPa，最佳工艺参数为：焊接温度 850℃，焊接时间 10 min，焊接比压力 10 MPa。

Al/Ti 扩散焊，可以采用 Ti 热浸 Al 工艺，使钛件表面生成渗铝层。钛件在 680℃浸铝的最佳时间为 25 min，扩散焊的最佳工艺为：焊接温度 490℃，压力 10 MPa，时间 20 min。接头抗拉强度达到 180 MPa。

扩散焊接主要是超塑性流动过程，同类材料的最佳扩散焊接温度通常在最佳超塑性成形（SPF）温度附近，不同钛合金之间的扩散焊接，由于β相转变温度的差别，情况比较复杂。在两被焊材料的最佳 SPF 温度之间，通常可以获得较好的焊接质量。

超塑性成形与扩散焊两个工艺过程合并到一个工序的新工艺，可以节约成本 80%左右，材料利用率也大大提高，已用于舱门、空心叶片和框段结构等。

2）液相界面扩散焊（LID） 也称扩散钎焊。所采用的时间、温度和焊前的清理工艺与扩散焊非常接近，只是压力要小得多，只要能使焊件相互接触便可。连接面上常常镀铜、镀镍或者加上一层厚 0.005～0.03 mm 的铜或镍箔作为过渡层。当加热到 900～950℃，铜与钛发生反应，在接头连接面上形成熔融的共晶体，该液相能润湿钛，并象一般钎焊一样填满接头间隙。焊件在该温度下至少保持 1.5 h。在 1～4 h 保温过程中，共晶液体与基本金属之间继续扩散，改变成分而固化。由于铜扩散到钛合金中，容易在接头中形成魏氏组织。

扩散钎焊接头的抗拉强度、剪切强度、圆滑试件的疲劳强度和耐应力腐蚀性能与母材相当，但缺口试件的疲劳强度和腐蚀疲劳性能略微低于母材，断裂韧性明显低于母材。

面积大、形状复杂和要求变形小的零件，采用扩散钎焊比较合适。扩散钎焊已用于航空、宇航工业中，例如用该法制造飞机蒙皮带筋条的钛合金壁板、喷气发动机的钛合金圆筒壳体和空心叶片等。

3）瞬间液相扩散焊（TLP） 采用化学成分与钛合金基体相近但熔化温度较低的中间层合金，在连接温度中间层合金发生熔化，并在连接面间形成液态薄膜。随后保温过程中，中间层合金与基体金属之间发生快速扩散，成分改变，熔点提高，从而在连接温度下产生等温凝固。继续保温，接头组织进一步均匀化，最终获得力学性能接近于基体金属的接头。例如，采用 Ti－（10～18）Zr－（14～16）Cu－（11～13）Ni 中间层合金和 930～960℃/3～6 h/接头间隙 0.02～0.04 mm 的工艺参数，获得的 Ti6242TLP 接头强度达到母材的 90%以上。焊接温度对接头性能影响最大，其次是接头间隙，而扩散时间的影响较小。

4.14 钎焊

由于钛的高温活性强，钎焊一般在真空或氩气保护下进行。为防止钛变色，要求真空室的压力为 0.0013～0.013 Pa。在 760～927℃温度范围内钎焊时，为了防止钛变色，要求惰性气体的露点为－57℃或更低。

钛与多数熔融的硬钎料容易熔成合金，因此容易进行钎焊。但是，在接头中形成过分合金化的倾向性很大，可能造成凹陷、形成金属间化合物，导致接头强度低、塑性差以及薄的钛板脆化。对此可采取两种预防措施：①选择与钛只产生轻微合金化且不形成脆性金属间化合物的硬钎料；②采用的钎焊周期使钎料保持熔融状态的时间很短。

在焊接或钎焊之前，或者在高温使用过程中，钛制构件不能与镉或汞接触，否则会发生脆化现象。

感应钎焊非常适用于钛的钎焊，尤其是采用容易与钛形成合金的钎料时，感应钎焊可以缩短钎焊周期，使接头中的合金化降至最低程度。炉中钎焊应选择不会与钛过分形成合金的钎料。火焰钎焊应在接头中预置钎剂，钎料可以预置于接头中也可以在钎焊过程中送进。推荐采用预置带钎剂的钎料的方法。

钎料主要有银基、铝基和钛基三类。铜基和镍基钎料由于形成脆性的金属间化合物，一般不宜使用。

纯银、Ag－5Al、Ag－5Al－5Ti、Ag－5Al－0.5Mn、Ag－5Al－1Mn－0.2Li、Ag－30Al、Ag－10Pd 和 Ag－9Pd－9Ga 都是比较好的钎料，还可用于钛与钢的连接。Ti－Cu 金属间化合物呈脆性，所以银基钎料中铜含量应保持低值。添加锂有助于加速扩散和使银基钎料与钛产生合金化。Ag－5Al－0.5Mn 硬钎料可以使钛接头具有良好的抗盐水喷射应力腐蚀性能和优良的剪切强度。其钎焊温度范围为 870～930℃。在钎料与钛连接面的扩散层是塑性较好的 Ag－Al－Ti 固溶体，这种钎料钎焊 Ti－6Al－4V 的抗剪强度为 137.8～206.7 MPa，即使在 400℃接头的抗剪强度仍可保持在 97 MPa，该钎料最适合于钛合金薄壁构件（如散热器、蜂窝结构等）的钎焊。表 4.8-18 是银基钎料的成分及有关性能。

表 4.8-18 银基钎料的成分及有关性能

合金成分	钎焊温度/℃	接头强度	其他性能
Ag－30Al－5Cu	680	抗拉强度 800～1 000 MPa	—
Ag－4Al－0.5Mn	870～930	抗拉强度好	润湿性好，延伸率高
Ag－5Al－0.5Mn	870～930	在 900℃、10 min 钎焊时抗拉强度最大	润湿性及流动性好
Ag－5Al－5Ti	910	—	流动性好
Ag－20Al－2.5Sn	737	强度较高	润湿性好

纯铝和一些铝合金如 Al－1.2Mn 和 Al－4.8Si－3.8Cu－0.2Fe－0.2Ni 可用作钎料，铝基钎料钎焊温度低，仅 580～690℃，可用来钎焊钛蜂窝结构。3003 和 4043 型铝合金和纯铝钎焊钛时，在大约 260℃以下具有良好的剪切强度和耐腐蚀性能。采用铝基钎料钎焊时会形成脆性（Ti－Al）金属间化合物，目前解决的措施是在钎焊温度短时保温以及添加适量的 Si 来减少金属间化合物的厚度。表 4.8-19 是钎焊钛合金用铝基钎料的成分及有关性能。

表 4.8-19 钎焊钛合金用铝基钎料的成分及有关性能

钎料成分	钎焊温度/℃	钎焊强度/MPa	其他性能
3003	680	—	流动性能很好
Al－10Cu－8Sn	600～620	38	—
Al－20Ag－10Cu	600～620	38	—
Al－10Si－0.5Mg	600～620	69	流动性能很好
Al－30Ag－10Cu	600～615	37	—
Al－33Cu	630	—	—

对于需要耐腐蚀性能好或在大约 538℃以下具有高强度的应用场合，推荐采用 Ti－48Zr－4Be 或 Ti－43Zr－12Ni－



2Be 钎料。可以用 Ti－15Cu－15Ni 钎料钎焊防冻机翼的蒙皮和波纹夹心板。用 Ti－48Zr－4Be 钎焊 TC4 合金管路，也可以将 Ti－Zr－Be 钎料用于钛与碳钢、奥氏体不锈钢、难熔金属和其他活性金属的钎焊。这些钎料的缺点是钎焊温度高(871～1 093℃)。钛基钎料中加入 Zr，可以降低钎焊温度。Ti、Zr 基钎料加工工艺性差，制备粉末、非晶箔带和丝材存在一定困难，可以采用混合粉反应钎料方法，即把一定粒度的纯金属粉末按钎料合金成分配比混合，作为钎料使用，在钎焊加热及保温过程中，金属粉末间相互扩散反应，因熔点降低而发生熔化和合金化，并完成钎焊填缝过程，采用该法钎焊 TC4 合金的接头强度达到 911.7 MPa。表 4.8-20 是目前已报道的 Ti 基钎料成分及有关性能。表 4.8-21 给出了 TC4 合金的钎焊工艺和接头性能。

表 4.8-20　Ti 基钎料成分及有关性能

钎料成分	熔化温度/℃	钎焊强度	其他性能
Ti－15Cu－15Ni	900～960	强度较高	流动性能一般，耐蚀性能好
Ti－48Zr－4Be	887～926	强度较高	流动性能好，对基体腐蚀小
Ti－70Cu－15Ni	910～960	—	在基体 α-β 转变温度以下具有很好的流动性
Ti－20Zr－20Cu－20Ni	850	热处理后强度达 1 400 MPa	—
Ti－37.5Zr－15Cu－10Ni	805～815	有足够高的强度	耐蚀性能好
Ti－35Zr－15Cu－15Ni	770～820		
Ti－25Zr－50Cu	780～815		

表 4.8-21　TC4 合金的钎焊工艺和接头性能

钎料	钎焊工艺	抗剪强度/MPa
Ti－22.5Cu－12.5Zr－9Ni	真空，930℃，保温 5 min	321～384
	真空，930℃，保温 20 min	397～493

钛与铝的钎焊最好选择真空钎焊工艺，采用 Al－10Si－Mg（BAl89SiMg）钎料，600℃钎焊的搭接接头抗剪强度为 71 MPa。Al87Si11.6Mg、Al87Si11.6Mg1.5Bi 钎料不仅使钎焊温度降低到 580℃以下，而且钎焊接头性能优良，尤其是 Al87Si11.6Mg1.5Bi 钎料，其钎焊的 TC4/L4 接头强度，超过 L4 基体，TC4/LD2 接头在保证 LD2 不发生过烧、组织致密的前提下，抗剪强度达 82.5 MPa。

在电子和高真空设备的较特殊领域中，通常将铜、陶瓷和磁性合金与钛钎焊在一起。常用钛-铍二元合金钎料。也可以采用 49Cu－49Ti－2Be 合金钎料。

在所有各种应用中，处于钎焊温度下的时间越短越好，以限制扩散作用和接头的合金化。用于熔化焊的清理工艺适用于钎焊。在火焰钎焊所用的钎剂不适宜于两种母材，或所用钎料不容易润湿其中某一母材时，如钛与软钢和不锈钢的火焰钎焊，可以采用特殊的表面准备，在钛或接头区另一金属表面熔敷一薄层钎料。这种工艺也可用于钛与不锈钢在无钎剂的氩气保护条件下采用银基钎料的感应钎焊或炉中钎焊。

5　焊缝缺陷及补焊工艺

5.1　焊缝缺陷

钛及钛合金焊缝缺陷包括气孔、裂纹、未焊透、钨夹杂、焊缝背面回缩以及因保护不良引起的缺陷。实际生产中钛合金焊接裂纹并不多见，主要有以下 3 种情况容易产生裂纹：①厚壁 α＋β 或 β 钛合金焊接采用 α 钛焊丝，使后几层焊缝合金元素含量很少，呈单相 α 组织，而 α 钛中氢的溶解度很低，使氢过饱和，出现氢化钛并引起脆化；②焊接保护不良，焊缝变脆引起焊接热应力裂纹；③含 β 稳定元素较多的钛合金（如 TC10）焊接时，如果结构刚性较大、焊接工艺不当，可能出现延时裂纹，预热缓冷等工艺措施可避免这类裂纹。焊缝背面回缩是由于焊缝上表面表面张力的垂直分量大于熔池自重和电弧压力引起的，背面气压过高也会引起回缩。采用阶梯形或浅 U 形坡口、减少背面保护气量，可避免背缩。

5.2　补焊工艺

当保护不良表面颜色超过表 4.8-22 的规定时，不允许通过重熔使焊缝变成银白色，而应将保护不良的这层焊缝加工掉，重新焊接，近缝区的氧化、氮化层也应用砂纸等清理干净。

表 4.8-22　焊缝和热影响区的表面颜色

<table>
<tr><th rowspan="2">焊缝级别</th><th colspan="4">焊缝</th><th colspan="4">热影响区</th></tr>
<tr><th>淡黄</th><th>深黄</th><th>金紫</th><th>深蓝</th><th>淡黄</th><th>深黄</th><th>金紫</th><th>深蓝</th></tr>
<tr><td>一级</td><td rowspan="3">允许</td><td>不允许</td><td rowspan="2">不允许</td><td rowspan="3">不允许</td><td rowspan="3">允许</td><td>不允许</td><td>不允许</td><td rowspan="2">不允许</td></tr>
<tr><td>二级</td><td rowspan="2">允许</td><td rowspan="2">允许</td><td rowspan="2">允许</td></tr>
<tr><td>三级</td><td>允许</td><td>允许</td></tr>
</table>

钨夹杂、裂纹和超过标准规定的气孔应按照 X 射线检验所确定的位置来除掉，经检验无缺陷后再进行补焊，补焊处仍需探伤检查。

未焊透如果能从焊缝背面进行补焊，最好在背面进行。

6　焊后热处理

焊后热处理的目的在于消除应力、稳定组织和获得最佳的物理－力学性能。真空热处理还可以降低氢含量和防止工件表面氧化。根据合金成分、原始状态和结构使用要求可分别进行退火、时效或淬火－时效处理。在高于 540℃大气介质中热处理时，钛及钛合金表面生成较厚的氧化层，需进行酸洗。为防止酸洗时增氢，应控制酸洗温度，一般应在 40℃以下。

6.1　退火

适用于钛及其合金，并且是 α 和 β 钛合金的唯一热处理方式。

α 和稳定 β 合金对退火后的冷却速度不敏感，而 α＋β 合金，特别是过渡型合金对冷却速度很敏感，后者要以规定速度冷却到一定温度，然后空冷或分阶段退火，为保证其热稳定性，开始空冷的温度不应低于使用温度。钛合金焊接接头推荐的退火温度如表 4.8-23 所示，退火时间由焊件厚度而定，不超过 1.5 mm 取 15 min，1.6～2.0 mm 取 20 min，2.1～6.0 mm 取 25 min，6～20 mm 取 60 min，20～50 mm 取 120 min。采用上述参数可完全消除内应力并保证较高的强度，而且空冷时不产生或少产生马氏体，故塑性也好。完全退火由于温度较高，需在真空或在氩气介质中进行，否则表面空气沾污严重。

表 4.8-23　钛及其合金退火温度

材料	TA1、TA2	TA6、TA7	TC1、TC2	TC3、TC4	TB2
退火温度/℃	550～680	720～820	620～700	720～800	790～810

19

不完全退火温度范围如表 4.8-24 所示。退火时间根据焊件厚度不同可在 1～4 h 变化。厚 4 mm 的 TC4 板材纵向拉应力峰值为 360 MPa，经 550℃、4 h 和 600℃、2 h 处理后分别降低 55% 和 73%。

表 4.8-24　钛及其合金不完全退火温度

材料	TA1、TA2	TA6、TA7、TC4	TC1、TC2	TC3
退火温度/℃	450～490	550～600	570～610	550～650

不完全退火在较低温度下进行，因而可在大气下进行。由于空气沾污轻微，故可用酸洗除去。

6.2　淬火－时效处理

这是一种强化热处理，其原理是高温快冷时保留亚稳定的 β、α′相，在随后时效时析出 α 和 β 相的弥散质点，形成平衡的 α+β 组织。而在低温（＜500℃）时效时，某些钛合金可能生成 ω 相。选择热处理工艺参数时应避免生成 ω 相，以防出现脆性。α+β 钛合金随淬火温度提高，接头强度提高而塑性降低。采用这种热处理的困难在于大型结构淬火困难，在固溶温度下大气中保温时氧化严重，淬火变形也难以校正。除结构简单的压力容器有时采用这种热处理工艺外，一般很少使用。

6.3　时效处理

许多钛合金焊接热循环起到局部淬火的作用，因此焊后可不再进行淬火处理。为保证基体金属的强度，采用焊前淬火、焊后时效处理。时效制度对 TC4 板材和焊接接头力学性能的影响如表 4.8-25 所示。

表 4.8-25　时效制度对 TC4 合金板材和焊接接头力学性能的影响

时效制度	材料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
550℃、4 h	焊接接头	1 005	956	7.0
	板材（横向）	1 072	983	11.2
	板材（纵向）	1 189	1 128	12.4
600℃、2 h	焊接接头	1 009	960	7.1
	板材（纵向）	1 155	1 103	13.6

6.4　热处理制度的选取

根据钛合金焊接结构的应用场合，可能对焊接接头的力学性能提出特殊的要求，例如强度和塑性的匹配、断裂韧度和塑性的兼顾以及对损伤容限的较高要求。这就要求根据合金的成分、组织、性能特点有针对性地选用合理的热处理制度。例如，α+β 钛合金的力学性能在很大程度上取决于 α 相的形貌，含有等轴 α 晶粒的组织具有更大的塑性、疲劳裂纹启裂阻力和高温流变能力，而含有层状 α 的组织表现出更高的断裂韧度、疲劳裂纹扩展阻力和蠕变强度。为获取所需性能，可以采用不同的热处理制度。表 4.8-26 给出了 TC1 合金焊缝经不同热处理得到的力学性能。表 4.8-27 则给出了热处理对 TC4 和 TC4（ELI）冲击韧度的影响。

表 4.8-26　TC1 合金电子束焊缝经不同热处理的力学性能

试样编号	热处理状态	α 相形貌	力学性能			
			屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	动态断裂韧度/kJ·m⁻²
1	母材，经退火（650℃、3 h，FC）	等轴	532	648	14	—
2	母材，经退火（850℃、3 h，FC）	等轴	483	610	15.5	68
3	母材，经 βQ（1 050℃、30 min，WQ）	层状	—	—	—	138
4	母材，经 βQ+TMT（SHT：770℃、15 h，FC）	等轴	70	—	—	—
5	母材，经 βQ+TMT（DHT：910℃、1 h，WQ；770℃、1 h，FC）	双态	145	—	—	—
6	焊缝，焊态	层状	633	835	8.5	165
7	焊缝，经退火（650℃、3 h，FC）	层状	546	682	10.8	175
8	焊缝，经退火（850℃、3 h，FC）	层状	499	638	11.6	197
9	焊缝，经（850℃、1 h，WQ，540℃、16 h，FC）	层状	513	653	11.2	182
10	焊缝，经 TMT（SHT：770℃、15 h，FC）	等轴	510	615	12.6	73
11	焊缝，经 TMT（DHT：910℃、1 h，WQ；770℃、1 h，FC）	双态	540	655	11.5	143

注：FC—炉冷；βQ—β 淬火；WQ—水淬火；TMT—热机械处理（在 750～800℃热轧，压下量 30%）；SHT—单热处理；DHT—双重热处理

表 4.8-27　热处理对 TC4 和 TC4（ELI）焊缝金属冲击韧性的影响　J

热处理状态＼材料	TC4			TC4（ELI）		
	母材	GTA 焊缝	EBW 焊缝	母材	GTA 焊缝	EBW 焊缝
退火	10	—	—	22	—	—
焊态	—	9	8	—	14	12
930℃、1 h，水淬火	5	5	4	9	10	8
930℃、1 h，空冷	15	11	12	25	16	14
930℃、1 h，炉冷	13	8	7	20.5	16	14
1 020℃、0.5 h，水淬火	4	—	4	10	8	8
1 020℃、0.5 h，空冷	9	9	9	14	14.5	14
1 020℃、0.5 h，炉冷	11	10	10	20	16.5	16
930℃固溶时效	6	5	4	11	9	6.5
1 020℃固溶时效	3	—	4	6	5	5
550℃、3 h，空冷	—	—	—	—	14.5	9.5
700℃、1 h，空冷	—	—	—	—	11	10

注：GTA—气保护钨极电弧焊；EBW—电子束焊；TC4（ELI）—超低间隙 TC4 合金

7　钛及钛合金的焊接实例

7.1　压力容器的焊接

航天压力容器大部分是由钛合金制造的。由于经过机械加工，在未沾污条件下焊前不用酸洗。可用石油醚或丙酮去油，用无水乙醇洗净。容器内的空气需用 10 倍以上的体积

表 4.8-28 压力容器焊接坡口形式和尺寸

壁厚/mm	1.0		3.0～5.0	
焊接方法	小等离子弧焊接	等离子弧焊接	钨极氩弧焊接	真空电子束焊接
坡口形式及尺寸/mm	0.5 0.5 0.5	2.5 2.5	60°	2 2
壁厚/mm	5.1～10.0			
焊接方法	等离子弧焊接		真空电子束焊接	
坡口形式及尺寸/mm	2.5 2.5		40° 2	

的氩气赶净，采用下部送气、上部出气的方法。TC4 钛合金焊前进行 950℃固溶、水淬处理。焊后进行 540℃、4 h 真空时效处理，以提高强度和降低残余应力。根据容器壁厚和使用的焊接方法选择焊接坡口形式和尺寸，如表 4.8-28 所示。焊接工艺参数如表 4.8-29 所示。

表 4.8-29 压力容器焊接工艺参数

壁厚/mm	焊接方法	电流/A	电压/V	极性	焊接速度/$m\cdot h^{-1}$	氩气流量/$L\cdot min^{-1}$			
						离子气	保护气	后拖保护	背面保护
1	小等离子弧焊	35	20	正接	12	0.5	10	10	2
4	等离子弧焊	160	24	正接	20	3	20	25	3
8	等离子弧焊	210	26	正接	20	4	20	30	3

7.2 管材对接

直径 4～10 mm 的细管对接焊，多采用全位置焊接，可采用旋转氩弧焊，也可采用多钨极氩弧焊。前者采用内齿轮带动钨极和电弧旋转，后者用均布于管材周围的多根钨极逐个点燃的方法实现电弧旋转。前者是直流氩弧焊，后者是脉冲氩弧焊。后者由于没有机械传动部位，故焊枪直径小，更适合于位置受限工位的焊接。ϕ10～50 mm 管材对接焊，内部用整体通气保护，外部可用如图 4.8-13 所示的拖罩保护。ϕ50～500 mm 管材对接焊，外部保护用与管直径相应的弧形拖罩保护，内部局部充氩保护。直径 500 mm 以上的管材对接焊，内外保护均用与管材内外表面贴紧的拖罩保护。

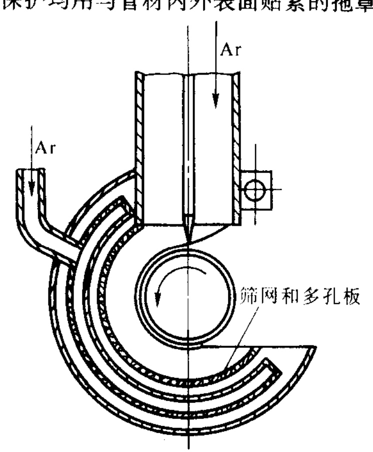


图 4.8-13 管材焊接拖罩结构示意图

7.3 30 万吨合成氨设备用工业纯钛焊接

10 mm 厚工业纯钛若用钨极氩弧焊，需开坡口焊 7 道左右，不仅效率低，而且需要大量填充焊丝和氩气，产生气孔等缺陷的概率也大。采用等离子弧焊可不开坡口，一次焊成，焊缝成形好。热影响区晶粒虽然较粗，但接头力学性能和抗腐蚀性均完全符合要求，焊接工艺参数如表 4.8-30 所示。

表 4.8-30 10 mm 钛板等离子弧焊接工艺参数

参数	数值	参数	数值
喷嘴孔径/mm	3.2	填充丝速度/$m\cdot h^{-1}$	96
钨极直径/mm	5	填充丝直径/mm	1.0
钨极内缩/mm	1.2	离子气/$L\cdot h^{-1}$	350
焊接电流/A	250	熔池保护气/$L\cdot h^{-1}$	1 200
焊接电压/V	25	拖罩保护气/$L\cdot h^{-1}$	1 500
焊接速度/$m\cdot h^{-1}$	9	背面保护气/$L\cdot h^{-1}$	1 500

7.4 整流器叶片钎焊

某航空发动机的 5～8 级整流器材料为 TC4 钛合金。要求一次把 60～80 个叶片同时钎焊到内外环上，且对整体要求变形越小越好。钎焊前装配时，把叶片逐件整体由外环插入，使叶片内端头插入内环的槽内。由于叶片有一定的扭度，装配很难保证钎焊间隙。为此用钛合金箔填充大间隙，把 ϕ1 mm 的丝状 Ag72CuNi 钎料弯成 U 形放在叶片与外环的结合处（如图 4.8-14 所示），用 0.1 mm 铁箔条压在叶片与外环上，采用手枪式电容储能点焊机点焊，使叶片、外环与钎料三者保持相对位置，再在外环端叶片上装放制备的钎料。钎焊采用真空钎焊，热态真空度不低于 10^{-2} Pa；钎焊温度为 850℃，钎焊保温时间为 10±2 min。

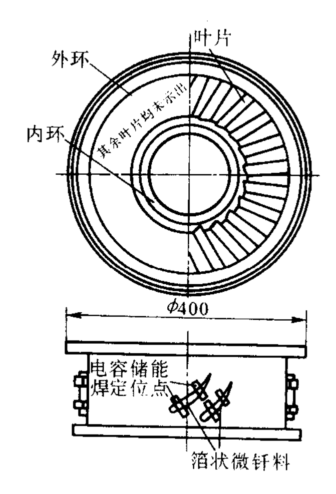


图 4.8-14 整流器叶片钎焊前装配示意图

编写：郭绍庆（北京航空材料研究院）
张学军（北京航空材料研究院）



第9章　铜及其合金的焊接

铜及铜合金可分为四大类，即：纯铜、黄铜、青铜和白铜。其中纯铜及黄铜应用较多，白铜应用很少。纯铜是指含Cu的质量分数达95%以上的所谓工业纯铜，由于其导电、导热性能极好，多用于制造电线、电缆、热交换器等。黄铜是铜锌合金的总称，因其颜色是黄色而得名。黄铜的强度、硬度比纯铜高，而且耐腐蚀性好，常用于制造船舶零件、弹壳、管嘴、轴承等。青铜是除铜锌、铜镍以外的所有铜基合金的总称，主要有铜锡、铜铝、铜硅等，依照其主要合金成分而分别称作锡青铜、铝青铜、硅青铜。青铜具有比纯铜和黄铜更高的强度和耐磨性，适于作为耐腐蚀的结构材料。白铜是铜镍合金，因颜色接近白色而得名。白铜的力学性能很高而且耐腐蚀性能也很好，常用于船舶和电气工业的冷凝管。

铜的热导率极高，大约为钢的6倍（铜与铁的物理性能比较见表4.9-1），因而焊接时散热很快，为保证良好的熔透，需要采用大功率、大线能量的焊接方法。散热快还使液态熔池存在的时间明显缩短，不利于冶金反应充分完成，而且容易造成气孔、裂纹、夹渣等缺陷。设计接头形式时要考虑到使两被焊零件厚度相差不能太大，以免由于散热条件差别而使得一侧来不及熔透，而另一侧已熔穿。液态熔池存在时间短会使冶金反应无法充分完成，也影响焊缝的良好成形。

表4.9-1　铜和铁的物理性能比较

金属	热导率 /W·(m·K)⁻¹		线胀系数 (20~100℃) /10⁻⁶K⁻¹	比热容 (20℃) /J (g·K)⁻¹	表面张力 /mN·cm⁻¹
	20℃	1 000℃			
Cu	393.6	326.6	16.4	0.348 9	12 (1 200℃)
Fe	54.8	29.3	14.2	0.460 2	18.35 (1 550℃)

铜及铜合金液态时流动性很好，如果单道焊而又不加衬垫要一次焊透，则很难保证焊缝正、反两面都成形良好，此时必须采用石墨、铜、石棉、焊剂等衬垫材料。

液态铜极易吸收氧、氢等气体，造成气孔、裂纹等缺陷，所以要求很好地保护熔池。氢与氧反应生成水蒸气，也可能造成气孔，适当的预热有助于减少或防止这类气孔。

1　铜及铜合金的焊接性

(1) 热导率高引起的熔化困难和热影响区宽度过大问题

由于散热很快，母材难于熔化而且不易与焊缝金属很好地熔合，必须采取预热和加大焊接热源功率等措施。同时，散热快还使热影响区变宽，从而也使焊接变形更加严重，所以要采取措施（如刚性夹具）减小变形，但要注意防止因刚性过大而引起裂纹问题。

(2) 杂质引起的裂纹问题

铜与很多种杂质或化合物都会形成低熔点共晶，如：Cu_2O+Cu；$Cu+Bi$；$Cu+Cu_2S$；$Cu+Pb$等低熔点物质分布于晶界，造成热脆性甚至引起结晶裂纹。此外，结晶温度区间大小当然也会影响结晶裂纹倾向，所以必须控制杂质及合金的含量，或在焊缝金属中加入脱氧的合金元素如Si、Mn、P等。在焊接工艺上则应当尽量减小接头的拘束，或用预热来减缓冷却速度，降低焊接应力。表4.9-2列出了几种主要铜合金的结晶温度区间。

表4.9-2　铜合金的结晶温度区间

合金成分（质量分数）/%	T/℃		结晶温度区间/℃
	固相线	液相线	
黄铜 Cu-63%，Zn-37%	902	915	13
锡青铜 Cu-92%，Sn-8%，P-0.38%	850	1 030	180
铝青铜 Cu-93%，Al-7%	1 040	1 042	2
硅青铜 Cu-98.75%，Si-1%，Mn-0.25%	1 040	1 070	30

(3) 气孔问题

铜及铜合金焊接时，形成焊缝气孔的倾向很大，一方面是有多种因素造成熔池内气泡，如在固-液态温度下，氢在固态和液态铜中的溶解度差别极大，结晶时氢逸出形成气泡；熔池中锌、磷等沸点低的元素蒸发也形成气泡；熔池中氢和CO会与Cu_2O作用形成水蒸气和CO_2，也形成气泡。此外，有些合金元素如锌、镉和磷，沸点很低，焊接时可能气化，形成气泡。由于铜及铜合金的热导率极高，所形成的气泡往往来不及逸出，如果残留在焊缝中就造成气孔。

为防止铜及铜合金焊缝气孔，必须减少氢、氧含量；填充金属中尽量减少低沸点元素，以免产生气体；预热以延长熔池存在时间，使气泡来得及逸出；采用含有铝、钛等强脱氧元素的填充材料来减少气体来源，都是有效措施。

(4) 其他接头性能变化问题

经过焊接热过程焊缝晶粒长大，杂质增多，合金元素烧损、蒸发……，铜及铜合金的接头性能会有较大的变化。

首先是导电性能明显下降。任何杂质或合金元素进入焊缝都会使导电性能下降。因此，纯铜焊接时为保证导电性能，必须力图防止杂质混入焊缝。其次，接头的力学性能，主要是因晶粒粗大和晶界存在杂质使塑性、韧性明显降低。这要采取焊缝合金化和变质处理来加以改善。此外，一些铜合金的耐腐蚀性是依靠锌、锰、镍、铝、锡等元素获得的，焊接时这些元素的烧损会使耐腐蚀性降低，因而必须加强对这些合金元素的保护，或者对焊缝进行合金化，防止耐腐蚀性降低。

2　铜及铜合金的熔焊方法

2.1　熔焊方法的选择

几乎所有各种熔焊方法都可以用于铜及铜合金的焊接，要根据工件的厚度、接头形式及合金类型适当选择焊接方法。其原则是尽量采用大功率、高能量密度的方法。表4.9-3列出了铜及铜合金的几种主要熔焊方法的使用范围。

2.2　熔焊用材料

铜及铜合金熔焊时基本上都需要填充金属，焊丝和焊剂是必不可少的。表4.9-4及表4.9-5分别列出了铜及铜合金用的标准焊丝及焊剂。

表 4.9-3 铜及铜合金的熔焊方法选择

焊接方法 \ 材料	纯铜	黄铜	锡青铜	铝青铜	硅青铜	白铜	简要说明
钨极气体保护焊	好	较好	较好	较好	较好	好	用于薄板（小于 12 mm），纯铜、黄铜、锡青铜、白铜采用直流正接，铝青铜用交流，硅青铜用交流或直流
熔化极气体保护焊	好	较好	较好	好	好	好	板厚大于 3 mm 可用，板厚大于 15 mm 优点更显著，电源极性为直流反接
等离子弧焊	较好	较好	较好	较好	较好	好	板厚在 3 ~ 6 mm 可不开坡口一次焊成，最适合 3 ~ 15 mm 中厚板焊接
焊条电弧焊	差	差	尚可	较好	尚可	好	采用直流反接，操作技术要求高，适用于板厚 2 ~ 10 mm
埋弧焊	较好	尚可	较好	较好	较好	—	采用直流反接，适用于 6 ~ 30 mm 的中厚板
气焊	尚可	较好	尚可	差	差	—	易变形，成形不好，用于厚度小于 3 mm 的不重要结构焊接
碳弧焊	尚可	尚可	较好	较好	较好	—	采用直流正接，电流大，电压高，劳动条件差，已逐渐被淘汰，只用于厚度小于 10 mm 的铜件

表 4.9-4 铜及铜合金标准焊丝

牌 号	名 称	主要化学成分（质量分数）/%	熔点/℃	主 要 用 途
HSCu	特别纯铜焊丝	Sn - 1.1，Si - 0.4，Mn - 0.4，Cu 余量	1 050	纯铜氩弧焊或气焊（配焊剂 CJ301），埋弧焊（配焊剂 431 或 150）
HSCu	低磷铜焊丝	P - 0.3，Cu 余量	1 060	纯铜气焊或碳弧焊
HSCuZn - 2	锡黄铜焊丝	Cu - 59，Sn - 1，Zn 余量	886	黄铜气焊或惰性气体保护焊，铜及铜合金钎焊
HSCuZn - 3	锡黄铜焊丝	Cu - 60，Sn - 1，Si - 0.3，Zn 余量	890	黄铜气焊、碳弧焊，纯铜、白铜等钎焊
HSCuZn - 4	铁黄铜焊丝	Cu - 58，Sn0.9，Si - 0.1，Fe - 0.8，Zn 余量	860	黄铜气焊、碳弧焊，纯铜、白铜等钎焊
HSCuZn - 5	硅黄铜焊丝	Cu - 62，Si - 0.5，Zn 余量	905	黄铜气焊、碳弧焊，纯铜、白铜等钎焊
非国标牌号（SCuAl）	铝青铜焊丝	Al - 7 ~ 9，Mn - ≤2.0，Cu 余量		铝青铜的 TIG 和 MIG 焊，或用作焊条的焊芯
非国标牌号（SCuSi）	硅青铜焊丝	Si - 2.75 ~ 3.5，Mn - 1.0 ~ 1.5，Cu 余量		硅青铜及黄铜的 TIG 和 MIG 焊
非国标牌号（SCuSn）	锡青铜焊丝	Sn - 7 ~ 9，P - 0.15 ~ 0.35，Cu 余量		锡青铜的 TIG 焊或用作焊条的焊芯

表 4.9-5 铜及铜合金气焊及碳弧焊用焊剂

牌 号		化学成分（质量分数）/%						熔点/℃	应 用 范 围
		$Na_2B_4O_7$	H_3BO_3	NaF	NaCl	KCl	其他		
标准	CJ301	17.5	77.5	—	—	—	$AlPO_4$ 5	650	铜及铜合金气焊、钎焊
标准	CJ401			7.5 ~ 9	27 ~ 30	49.5 ~ 52	LiAl 13.5 ~ 15	560	青铜气焊
非标准	1	20	70	10	—	—	—	—	铜及铜合金气焊及碳弧焊
非标准	2	56	—	—	22	—	K_2CO_3 22	—	铜及铜合金气焊及碳弧焊
非标准	3	68	10	—	20	—	碳粉 2	—	铜及铜合金气焊及碳弧焊
非标准	4	LiCl 15	—	KF7	30	45	Na_2CO_3 3	—	铝青铜气焊

铜及铜合金使用的焊条见表 4.9-6。



表 4.9-6 铜及铜合金使用的焊条

国标	焊缝主要成分（质量分数）/%	焊缝金属性能	主要用途
ECu	纯铜：Cu > 99	$\sigma_b \geq 176$ MPa　$\alpha > 120$	在大气及海水介质中具有良好的耐蚀性，用于焊接脱氧或无氧铜构件
ECuSi	硅青铜：Si – 3；Mn < 1.5；Sn < 1.5；Cu 余量	$\sigma_b > 340$ MPa　$\delta_5 > 20\%$　HV110 ~ 130	适用于纯铜、硅青铜及黄铜的焊接，以及化工管道等内衬的堆焊
ECuSiB	磷青铜：Sn – 8；P≤0.3；Cu 余量	$\sigma_b \geq 270$ MPa　$\delta_5 > 15\%$　HV80 ~ 115	适用于焊纯铜、黄铜、磷青铜，堆焊磷青铜轴衬、船舶推进器叶片等
ECuAl	铝青铜：Al – 8；Mn≤2；Cu 余量	$\sigma_b > 410$ MPa　$\delta_5 > 15\%$　HV120 ~ 160	用于铝青铜及其他铜合金，铜合金与钢的焊接以及铸件焊补等

2.3 熔焊工艺注意事项

由于必须使接头两侧散热比较相近才能保证加热均匀，熔化和熔合都比较一致，所以接头形式最好是对接，而且两侧厚度相同，如果厚度不同，必须加工出过渡段，使焊缝两侧厚度相同。T形接头、搭接接头都是很难焊好的。

由于铜及铜合金的性能特点，它们熔焊时的工艺条件和焊接规范也与钢有很大不同。例如，通过预热可以部分克服由于高热导率引起的加热不均和焊缝凝固过快等问题，改善焊缝成形，防止气孔、裂纹等缺陷，并减小残余应力，从而也使接头力学性能有所提高。厚度超过 10 ~ 15 mm 的工件，在焊接前都需要按照材料不同，用气焊火焰或其他方法预热到下列温度：纯铜 250 ~ 300℃，黄铜 300 ~ 350℃，青铜 500 ~ 600℃。

铜及铜合金对接接头碳弧焊时的大致焊接规范见表 4.9-7。纯铜单道用焊条手工电弧焊的大致焊接规范见表 4.9-8。

表 4.9-7 铜及铜合金对接碳弧焊的大致规范

厚度/mm	电极直径/mm	弧长/mm	焊接电流/A
2	6 ~ 7	5 ~ 8	125 ~ 200
5	8	10 ~ 15	200 ~ 350
8	10 ~ 12	15 ~ 20	300 ~ 450
13	15	25 ~ 30	500 ~ 700

表 4.9-8 纯铜单道手工焊条电弧焊的大致焊接规范

厚度/mm	焊条直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V
2	2 ~ 3	100 ~ 120	25 ~ 27
3	3 ~ 4	120 ~ 160	25 ~ 27
4	4 ~ 5	160 ~ 200	25 ~ 27
5	5 ~ 6	240 ~ 300	25 ~ 27
6	5 ~ 7	260 ~ 340	26 ~ 28
7 ~ 8	6 ~ 7	380 ~ 400	26 ~ 28
9 ~ 10	6 ~ 8	400 ~ 420	28 ~ 30

表 4.9-9 列出了纯铜钨极氩弧焊的大致焊接规范。

表 4.9-9 纯铜钨极氩弧焊的大致焊接规范

厚度/mm	电极直径/mm	焊丝直径/mm	焊缝道数（除打底焊道外）	焊接电流/A	氩气流量/$L \cdot min^{-1}$
1.2*	2.5 ~ 3.0	1.6	1	120 ~ 130	7 ~ 8.5
1.5*	2.5 ~ 3.0	2.0	1	140 ~ 150	7 ~ 8.5
2.5*	3.5 ~ 4.0	2.5 ~ 3.0	1	220 ~ 230	7.5 ~ 9.5

续表 4.9-9

厚度/mm	电极直径/mm	焊丝直径/mm	焊缝道数（除打底焊道外）	焊接电流/A	氩气流量/$L \cdot min^{-1}$
3①	3.5 ~ 4.0	2.5 ~ 3.0	1	230 ~ 240	7.5 ~ 9.5
10②	4 ~ 4.5	3.0	3	第 1 道 200 ~ 350	7 ~ 8
		5.0		第 2 道 200 ~ 350	7
		6.0		第 3 道 200 ~ 400	7
		3.0		打底焊道 250 ~ 350	7
12②	4 ~ 4.5	3.0	4	第 1 道 250 ~ 350	8 ~ 10
		5.0		第 2 道 250 ~ 400	
		6.0		第 3 道 300 ~ 450	
		6.0		第 4 道 300 ~ 450	
		3.0		打底焊道 250 ~ 350	
19③	5 ~ 5.5	3.0	6	第 1、2 道 250 ~ 400	10 ~ 12
		5.0		第 3、4 道 250 ~ 450	
		6.0		第 5、6 道 300 ~ 550	
25③	5 ~ 5.5	3.0	8	第 1、2 道 250 ~ 400	12 ~ 14
		5.0		第 3、4 道 300 ~ 450	
		6.0		第 5、6 道 300 ~ 550	
		6.0		第 7、8 道 350 ~ 600	

① 不开坡口。
② 70° ~ 90°V 形坡口。
③ 70° ~ 90°X 形坡口。

气焊由于热量较小，焊接速度很低，常常需要预热及辅助加热。气焊时的接头设计可参见表 4.9-10。使用的焊炬喷嘴应比焊接同样厚度的钢时大些。为了使焊道金属厚度大些并防止氧被卷入，常采用后倾焊方式。焊缝很长时，考虑到焊缝收缩的需要，工件装配时在长度方向上应逐渐加大根部间隙。气焊后，对焊缝金属可在热态或冷却后进行锤击，消除应力。冷作加工能够提高焊缝金属的强度。

表 4.9-10 气焊铜时的接头设计

金属厚度/mm	接头设计	根部间隙/mm	注
1.5	卷边接头	0	—
1.5	I 形坡口	1.5 ~ 2.3	—
3.3	I 形坡口	2.3 ~ 3.3	—
4.8	60° ~ 90°V 形坡口	3.3 ~ 4.6	要求辅助加热
6.4	60° ~ 90°V 形坡口	3.3 ~ 4.6	要求辅助加热
9.7	60° ~ 90°V 形坡口	4.6	要求辅助加热
12.7 ~ 19	90°X 形坡口	4.6	立焊位置双面同时焊接



摩擦焊用于连接铜及其合金具有一定的优越性，其热影响区很窄，接头中不存在铸造组织，性能良好。利用温度、压力和变形的组合，在固态下不经熔化也可能实现铜的连接，就是所谓的固态焊接。如退火铜在室温下的冷压焊、高温下的扩散焊等。

此外，其他如等离子焊、电子束焊等熔化焊方法，能量密度大，符合焊接铜及铜合金的需要，但他们对接头加工、装配的要求比较严格。电子束焊由于在真空中进行，一些低熔点、低沸点的元素如锌、锡、磷等可能大量蒸发损耗，不但影响焊缝的合金成分和接头性能，而且还可能破坏真空度而使焊接过程中断。

3　铜及铜合金的钎焊

铜及大部分的铜合金由于表面没有很难处理的氧化膜，钎焊性是比较好的。只有含铝的黄铜和铝青铜因为氧化铝的膜不易清除，钎焊十分困难。

3.1　铜及铜合金的硬钎焊

3.1.1　钎料

铜及铜合金硬钎焊的钎料熔化温度在450℃以上，常常是在600～850℃之间，随合金种类和零件用途而不同。常用的硬钎焊钎料有以下几种类型。

① 银基钎料　主要成分是银、铜和锌，有的还加入少量的锡和镍，熔点较低。其牌号是HL3××，如HL302、HL303、HL304、HL306、HL322等。采用银基钎料时，接头的装配间隙以0.05～0.25 mm为宜。银基钎料适合于钎焊铜与各种铜合金、铜与钢等。由于含银，这种钎料价格比较贵一些。

② 铜磷钎料　主要成分是铜和磷，有的还加入一些锡。其牌号是HL2××，如HL201、HL202、HL204、HL208等。铜磷钎料具有一定的自钎作用，润湿性良好，有时可以不加或少加钎剂进行钎焊，合适的接头装配间隙为0.02～0.15 mm。接头耐腐蚀性好，但比较脆。各种铜磷钎料分别适用于电机及仪表中铜及铜合金的钎焊。

③ 铜锌钎料　主要成分是铜和锌，有时加入少量锡、硅、镍等。这种钎料熔点高而耐腐蚀性差，多用于不太重要的接头。其牌号是HL1××，如HL101、HL102、HL103、HL104等。铜锌钎料钎焊时的接头装配间隙为0.07～0.25 mm。各种铜锌钎料分别适用于纯铜、黄铜、白铜的钎焊，其接头强度、韧度都较低。

常用的铜及铜合金硬钎焊钎料见表4.9-11。

此外，含金的钎料具有良好的钎焊性，但价格昂贵，一般应用很少，只在有特殊要求时才采用。

表4.9-11　铜及铜合金硬钎焊钎料

钎料系列	牌号	化学成分（质量分数）/%	熔化温度/℃		力学性能		推荐间隙/mm	用　途
			固相线	液相线	σ_b/MPa	δ/%		
银基钎料	HL302	Ag25 Cu40 Zn余量	745	775	360	—	0.05～0.25	钎焊铜与各种铜合金，铜与钢，铜与不锈钢等
	HL303	Ag45 Cu34 Zn余量	660	725	390	—	0.05～0.25	
	HL304	Ag50 Cu34 Zn余量	690	775	350	—	0.05～0.25	
	HL306	Ag65 Cu20 Zn余量	685	720	390	—	0.05～0.25	
	HL322	Ag39～41 Cu24～26 Sn2.5～3.3 Ni1.1～1.7 Zn余量	630	640	400	—	0.05～0.25	
铜磷钎料	HL201	P7～9 Cu余量	710	800	480	—	0.02～0.15	用于电机仪表工业中钎焊铜及铜合金
	HL202	P5～7 Cu余量	710	890	450	—	0.02～0.15	
	HL204	P4～6 Sn14～16 Cu余量	640	815	510	—	0.02～0.15	钎焊铜及铜合金
	HL208	P5～7.5 Sn5～6 Cu余量	650	800	—	—	0.02～0.15	用于空调、电机中钎焊铜及铜合金
铜锌钎料	HL101	Cu34～38 Zn余量	800	823	30	0～3	0.07～0.25	钎焊纯铜、黄铜
	HL102	Cu46～50 Zn余量	860	870	210	3	0.07～0.25	钎焊H62黄铜不受力件
	HL103	Cu52～56 Zn余量	885	888	260	5	0.07～0.25	钎焊铜、青铜不受冲击件
	HL104	Cu60～63 Sn0.05～0.3 Si0.17～0.3 Ni0.2～0.6 Zn余量	850	875	400	≥20	0.07～0.25	钎焊铜、白铜

3.1.2　钎剂

铜及其合金硬钎焊使用的钎剂有两大类，一类以硼酸盐和氟硼酸盐（KBF_4，H_3BO_3，B_2O_3等）为主，其作用是较好地清除氧化膜，并能很好地漫流，获得满意的钎焊效果，配合银基钎料或铜磷钎料适用于各种铜合金。另一类则以氯化物和氟化物（$ZnCl_2$，NH_4Cl，$CdCl_2$，LiCl，KCl，NaF等）为主，是高活性钎剂，应用于钎焊含铝的各类铜合金，但此类钎剂腐蚀性极强，焊后必须彻底清除接头上的残渣，以免日后造成腐蚀。

3.1.3　钎焊方法

绝大多数钎焊方法如炉中钎焊、火焰钎焊、烙铁钎焊、感应钎焊等，都可以用于铜及其合金的硬钎焊。可以根据工件尺寸、使用要求、批量大小，并结合钎料、钎剂的种类来选定钎焊方法。

3.2　铜及铜合金的软钎焊

铜及大多数铜合金软钎焊性是比较好的，不会有很大困难，如纯铜、铜锡合金、铜锌合金、铜镍合金、铜铬合金等，软钎焊都不存在大问题。但含有硅、铝和铍的铜合金则要求使用专门的钎剂以去除表面的氧化膜。

3.2.1　钎料

铜及其合金软钎焊使用的钎料主要是锡铅软钎料。不过锡可能与铜形成合金化并且会扩散。铜合金会与锡形成固溶体，但当锡的含量超过固溶度时，会生成一种或多种金属间化合物（如Cu_6Sn_5），造成接头脆化及强度降低。确定工艺参数时必须考虑到防止和减少生成金属间化合物的问题。



3.2.2　钎剂

铜合金表面在清理后会很快地又生成新的氧化膜，因而必须在清理后迅速施加钎剂并进行钎焊。使用质量分数为锡 50% – 铅 50% 和质量分数为锡 95% – 锑 5% 的钎料时，可选用含氯化锌和氯化铵的液态或膏状钎剂。但必须注意腐蚀问题。

无腐蚀性的有机钎剂和树脂型钎剂用于含锌或含锡的铜合金较好，不过必须对合金表面事先清理好，并涂抹上薄层钎剂。

必须引起注意的是，无论有机钎剂或无机钎剂，在软钎焊之后一定要清除钎剂残余物，以免日后发生腐蚀损坏。在潮湿环境下工作的接头尤其需要彻底清除钎剂残余物。

3.2.3　钎焊方法

软钎焊的加热方法很多，浸入温度高于钎料熔点的液态介质中加热、电阻加热、红外加热等都有应用。在一些印刷电路板的生产中，流水线上常用波峰焊方法。

编写：包芳涵（清华大学）



第 10 章　难熔合金的焊接

难熔金属通常是指熔点高于2000℃的一些金属，除具有很高的熔点外，它们大多具有很高的密度、良好的高温强度和弹性模量，较高的抗腐蚀性能。工业上常用而且又需要焊接的难熔金属主要有钨、钼、钽、铌等，这些金属的熔点和密度见表 4.10-1。

表 4.10-1　几种难熔金属的熔点和密度

金属	W	Mo	Nb	Ta
熔点/℃	3 390	2 620	2 468	2 996
密度/$g \cdot cm^{-3}$	19.3	10.2	8.57	16.6

由于具有上述这些特殊的性能，尤其是良好的高温性能，难熔金属及其合金常被用于航空、航天、核能、电子、化工等重要领域。因为使用条件苛刻，焊接这些材料时，对质量的要求往往也是很严格的。

1　钨的焊接

由于高温性能和耐腐蚀性能突出，钨在需要耐高温、耐腐蚀的核能工业、航空航天、电子工业（如需要达到很高温度的热阴极）以及许多民用工业中都得到了广泛的应用。钨的材料形式大多是丝状、棒状或带状。

1.1　钨的焊接性

钨的熔点是难熔金属中最高的，达 3390℃，其密度也最高，达 19.3 g/cm^3。钨在常温下性能稳定，空气或氧不与它发生作用，耐腐蚀性也很好。但高温下却与空气和氮发生反应。一般来说，钨及钨合金在室温和高温下强度都很高，但低温下显现脆性，由于其塑－脆转变温度只有 240～250℃，所以即使在室温条件下，钨的塑性、韧性也不高。许多冶金因素包括生产方法、加工硬化、再结晶、晶粒尺寸、合金成分、加热冷却、应力集中等，都对这一转变温度有影响。

钨对杂质十分敏感，杂质污染会使延性降低。凝固或再结晶时容易形成粗大晶粒的显微组织，也会使延性降低。由于室温下还比较脆，必须尽量减小变形速率。焊接时要采用小线能量，减少热输入，既防止粗大组织，又缩小热影响区。接头设计应力图避免应力集中，以免形成裂纹。

钨及钨合金熔点极高，因而焊接时必须达到足够高的温度才足以使之熔化，而且钨及钨合金的硬度极高，形状复杂的坡口只能用电解侵蚀的方法加工。此外，坡口还需经过严格的化学清洗才能进行焊接。

1.2　钨的焊接方法

钨及钨合金的焊接必须采用充气室惰性气体保护焊或电子束焊。而且 3～4 mm 厚的钨只有采用电子束焊才能保证最佳的焊接质量。在很多情况下，如能达到最窄的焊缝和最小的热影响区是焊接接头质量良好的标志。

1.2.1　焊接前的清洗

焊接或钎焊前，表面必须干净而无尘土、氧化物、油脂等杂质，以免影响润湿、熔敷及元素扩散，或造成焊缝污染。

钨的焊件表面可首先用溶剂清洗除脂，然后选用下列任何一种方法清洗：①在沸腾的 20% 氢氧化钾溶液中浸洗；②在 20% 氢氧化钾溶液中电解浸洗；③在体积分数为 50% HNO_3－50% HF 的溶液中化学浸洗；④在熔融氢氧化钠中浸洗。无论采用上述哪种方法清洗，最后都必须用清洁的水冲洗掉所有的清洗液体介质，再用热空气吹干工件。

1.2.2　钨及钨合金惰性气体保护焊和电子束焊

钨及钨合金必须在高纯度的惰性气体中或在高真空中进行熔化焊，以防被氧污染。所用的夹具要考虑尽量减小对接头的拘束，尤其在工件形状复杂时更为重要。焊前需对工件进行预热，预热要达到塑—脆转变温度以上。

惰性气体可采用氩气，也可以采用氦气。电源要用直流正接。尽量采用小线能量，保持尽可能窄的热影响区。

钨及钨合金惰性气体保护焊和电子束焊时大致焊接规范见表 4.10-2 和表 4.10-3。

表 4.10-2　钨合金惰性气体保护自动钨极电弧焊的大致焊接规范

厚度/mm	气体	电流/A	电压/V	焊速/$m \cdot h^{-1}$
0.5	He	65～75	18～19	2.8
		95～105	17.5	11.2
		150～170	20	22.4
1	He	160～170	18～19	2.8
		210～230	20	11.2
		320～340	20～22	22.4
	Ar	160～170	7～8	5.04
2	He	260～280	17	2.8
		440～470	20	19.6
	Ar	290～310	11～12	7.2
2.6	Ar	350	10～15	4.2

表 4.10-3　钨合金电子束焊的大致焊接规范

厚度/mm	电流/mA	加速电压/kV	焊速/$m \cdot h^{-1}$
0.12	2.9	90.0	42.0
0.51	60	20.0	2.6
1.0	22.5	30.0	15～19
1.5	37.5	30.0	19.0
2.0	115	21.5	2.8
2.0	170	21.5	19.6
2.5	16	150	8.4

1.2.3　钨的钎焊

钨在再结晶后会使强度、塑性都显著降低，所以钎焊温度应尽量低于其再结晶温度，另外要考虑钎料的膨胀系数应与钨的膨胀系数接近，以免接头产生过大的应力。钎焊前，钨的表面必须清洗干净，而且为改善润湿条件，最好在钨的表面镀铜或镀镍。钨可以在任何保护气体或还原性气体中钎焊，但为获得致密的钎缝，当然最好是在真空中钎焊。不过，真空钎焊要注意钎料中元素的蒸气压和蒸发气体对母材和钎缝金属性能的影响。接头间隙以 0.05～0.13 mm 为宜。钨的热膨胀系数很小，在设计接头形式和选择夹具材料时必须加以注意，在与其他金属连接时也应考虑两者膨胀收缩的差异。

钨钎焊时的钎料可从难熔金属用钎料（表 4.10-4）中选用。通常，银基、铜基钎料只适用于不高的工作温度（如钎焊电触点）。镍基、锰基钎料和纯金属铌、钽钎料可用于高

温工作。曾有铂基钎料的钎焊件使用到 2 150℃ 的高温，如果钎焊后再经过 1 080℃ 的扩散处理，接头更能够在 3 038℃ 下使用。

表 4.10-4 难熔金属用钎料

钎料	熔点/℃	钎料	熔点/℃	钎料	熔点/℃	钎料	熔点/℃
Nb	2 395	Ag-Cu-Zn-Mo	718～787	Mo-B	1 899	Ni-Cr-Si	1 121
Ta	3 005	Au-Cu	885	Nb-Ni	1 190	Pd-Ag	1 316
Ag	960	Au-Ni	949	Ni-Cu	1 349	Pd-Al	1 177
Cu	1 083	Au-Ni-Cr	1 083	Ni-P	876	Pd-Cu	1 204
Ni	1 453	Cu-Mn	871	Ni-Ti	1 288	Pd-Fe	1 316
Ag-Mn	971	Cu-Ag-P	645～815	Ni-Cr-B	1 066	Pd-Mo	1 571
Ag-Cu-Mo	779	Mn-Ni-Co	1 021	Ni-Cr-Fe	1 427	Pd-Ni	1 204

钎焊方法，通常是在干燥的惰性气体（氩气、氦气）或还原性气体（如氢气）的炉子中加热，也可以在真空中加热，此外，气焊火焰、电阻，以及感应加热也有应用。

由于钨的脆性，零件钎焊前组装时要防止形成应力，并要避免与石墨接触，以防生成脆性的碳化钨。采用熔点较高的镍基钎料时要尽量降低钎焊温度，防止钨的再结晶。

火焰钎焊时，可采用银基或铜基钎料和与之相应的钎剂。

此外，还有可能采用钎焊与扩散焊结合的方法来连接钨，获得良好的接头。钎料的温度应低于钨的再结晶温度。而且，钎料中的一种或几种元素能溶解于钨中或者至少局部溶解于钨中。元素之间可以相互溶解，随后在进一步的扩散过程中会完全溶解，就好像两个工件直接连接起来一样。这样形成的接头在高温下工作也是稳定可靠的。

1.2.4 钨的其他焊接方法

真空扩散焊：钨可在真空度为 7×10^{-3} Pa、压力为 19.6 MPa，温度为 2200℃下，经 15 min 完成扩散焊。

摩擦焊：钨摩擦焊时不会产生粗大结晶组织，热影响区很窄，但要求旋转速度极高。加工态钨摩擦焊工艺参数为：旋转线速度 13 m/s，顶锻压力 385 MPa；退火态钨摩擦焊工艺参数为：旋转线速度 18 m/s，顶锻压力 210 MPa。

2 钼的焊接

钼的高温强度良好，适于制造高温炉内的发热元件及反射屏等。其晶体结构为体心立方，故在温度降低时会出现塑性至脆性的转变，该转变温度可能低于或远高于室温，所以钼及钼合金熔焊的焊缝在室温下常常是很脆的。

2.1 钼的焊接性

钼的熔点比钨的熔点低，为 2620℃，室温下也是稳定的，在空气或氧气中 400℃开始氧化，600℃以上剧烈氧化，生成 MoO_3，此氧化物的熔点只有 795℃，沸点也只有 1 480℃，显然对焊接极为不利。钼中的杂质种类及含量对其性能，尤其是焊接性影响显著。粉末冶金方法制造的钼材，其杂质含量比电子束熔炼制造的钼材杂质含量高。

在钼中会含有氧和氮，焊接时还可能吸收氧和氮，形成的氧化物、氮化物在晶界形成连续的薄膜，使材料的塑性严重变差，甚至因热应力而开裂。

2.2 钼的焊接方法

钼及钼合金必须在高纯度的惰性气体保护下，或在高真空中焊接。为了细化晶粒，改善薄膜在晶界的分布，防止过度脆化，焊接方法要考虑尽可能缩小焊缝和热影响区宽度。此外，焊接接头对应变速率和应力集中十分敏感，焊缝成形应尽量平滑，避免缺口。当然，焊接时接头承受的拘束越小越好。

工件在焊接前要预热到高于金属塑性至脆性的转变温度，焊接后尽快地加热到低于母材再结晶温度以消除接头残余应力。

2.2.1 焊接前的清洗

工件在焊接前必须清理干净，没有任何油脂、尘土或氧化物，因而首先要用溶剂除去油脂，然后在质量分数为 95% H_2SO_4 - 4.5% HNO_3 - 0.5% HF - 0.5% Cr_2O_3 的溶液中浸洗。

2.2.2 钼及钼合金钨极惰性气体保护电弧焊

钼及其合金钨极电弧焊是在加入经干燥提纯的 Ar 或 He 的充气室内进行的。厚度小于 4 mm 时，可以不加填充丝而单面、单道焊成焊缝。焊接规范见表 4.10-5。

表 4.10-5 钼合金惰性气体保护钨极自动电弧焊的大体规范

厚度/mm	焊速/m·min⁻¹	氦气中焊		氩气中焊	
		电流/A	电压/V	电流/A	电压/V
0.5	2.8	50～60	18	—	—
1	2.8	100～120	17.5	120～135	10
1	5.6	130～140	18	140～160	12
1.5	2.8	170～190	18	—	—
2	2.8	200～225	18	200～240	10
2	5.6	255～270	18	260～300	10
3	2.8	—	—	300～340	10
4	2.8	450～470	18	400～450	10

2.2.3 钼及钼合金的电子束焊

电子束焊时控制真空室内压强应优于 0.013 Pa，以免使杂质进入焊缝。在真空中焊接时实际上也在不断对焊缝金属进行着清除气体杂质的过程，对接头质量有好处。厚度小于 12 mm 时，不加填充，可以单面一次焊透。焊接规范见表 4.10-6。

表 4.10-6 钼及其合金电子束焊的大体规范

金属	厚度/mm	电流/mA	加速电压/kV	焊速/m·min⁻¹
Mo	1.0	70～80	18～20	16.8
	2.0	100～120	20～22	11.2
	3.0	200～250	20～22	8.4
Mo-0.5Ti	0.125	1.2	85	11.2
	1.50	7.0	120	11.2
	2.5	12.0	135	11.2

此外，扩散焊在真空室内进行，真空室内压强要低于 3.5 MPa，加热温度在 1 300℃以上。利用环形电子枪进行电子束加热。焊钼时可以加中间层，也可以不加。表 4.10-7 为加中间层扩散焊钼时的大体焊接规范。

表 4.10-7 加中间层扩散焊钼时的大体焊接规范

序号	中间层材料	焊接温度/℃	压力/MPa	焊接温度保持时间/ks
1	—	1 800	10	0.9～1.2
2	—	1 600	12～20	1.2
3①	—	900	150	1.2
4	Cu	950	15	0.6
5	Ni	930	70	1.2
6	Ti	900	70～80	1.2

① 序号 3 表面抛光，其余序号为磨光。

2.2.4 钼的钎焊

钼的钎焊性与钨相近，选择钎焊方法、钎料和钎剂都有共同之处。

钎焊钼时使用的钎料可参见表 4.10-4。要注意，镍与钼在 1 316℃左右的温度下会生成低熔点共晶体，所以高温下使用的工件不能采用镍基钎料。Mo－0.5Ti 钼合金钎焊时，可用的钎料有几种，其中 V－35Nb（钒－铌钎料），其真空钎焊工艺参数为：真空度 1.33×10^{-3} Pa，钎焊温度 1 650℃，保温时间 5 min。Ti－30V（钛－钒钎料），其真空钎焊工艺参数为：真空度 1.33×10^{-3} Pa，钎焊温度 1 870℃，保温时间 5 min。这两种钎料的钎焊质量都比较好，对钼的润湿良好，而且对钼的熔蚀极小。

2.2.5 钼的其他焊接方法

真空扩散焊：钼可在真空度为 7×10^{-3} Pa、压力为 9.8 MPa，温度为 1 700℃下，经 10 min 完成扩散焊。

摩擦焊：钼摩擦焊时不会产生粗大结晶组织，热影响区很窄，但要求旋转速度极高。加工态钼摩擦焊工艺参数为：旋转线速度 9 m/s，顶锻压力 420 MPa；退火态钼摩擦焊工艺参数为：旋转线速度 11 m/s，顶锻压力 280 MPa。

3 钒、铌、钽及其合金的焊接

3.1 钒、铌、钽及其合金的焊接性

钒、铌、钽及其合金焊接时，焊缝及热影响区晶粒长大严重，塑－脆性转变温度提高，焊缝吸收杂质较多时更为明显。再结晶更使其强度和塑性降低。含有合金成分时对焊接热循环更加敏感，因为焊缝和热影响区析出第二相再加上弥散强化的作用，塑性降低更多。所以，选择焊接参数和热处理参数时必须更加注意。

焊接前的坡口应该机械加工，经过酸洗并用冷水彻底冲洗干净，临焊接前还用酒精擦拭。组装部件时要佩戴清洁的手套。总之，要严格避免对坡口的任何污染。

3.2 钒、铌、钽及其合金的钨极惰性气体保护焊

常用的钨极惰性气体保护焊方法由于容易混入大气中的各种气体杂质，而这类金属及合金又对杂质十分敏感，所以不宜采用。常用的方法是在充气室内的钨极惰性气体保护焊，可以使杂质气体极少，所用的惰性气体必须经过提纯和除湿处理。

充气室要先抽真空再充入惰性气体，气体为氩或氦，不过氦更适当，因为在氦气氛中焊接时电流可比在氩气氛中小很多。焊接钽和钽合金时，厚度 1 mm 以下可用氩气保护，1 mm以上就用氦气或氦与氩的混合气体。引弧时应使用高频振荡器。为防止熔透不均或烧穿，装配间隙必须尽量减小，一般不大于 0.15 mm。焊接规范参见表 4.10-8。

表 4.10-8 铌、钒、钽钨极惰性气体保护焊的焊接规范

金属种类	厚度/mm	电流/A	电压/V	焊速/$m\cdot min^{-1}$	保护气体
Nb	1	100	8	0.28	Ar
	1	175	9	1.12	
	1	270	10	2.8	
	2	220	10	0.42	
	2	420	11	1.68	
	3	360	12	0.42	
	1	70	14	0.28	He
	1	125	14	1.12	
	1	200	16	2.24	
	2	120	16	0.28	
	2	270	16	1.68	
V	1	70	11	0.28	Ar
	1	125	11	1.68	
	2	320	12	1.4	
	1	35	14	0.28	He
	1	45	14	0.7	
	1	100	15	1.68	
	2	80	16	0.28	
	2	220	16	1.68	
Ta	0.5	80	10	1	Ar
	1	140	12	0.8	
	1.5	180	12	0.8	
	2	250	12	0.7	
	1	85	16	0.28	He
	1	140	16	1.12	
	1	230	16	2.24	

3.3 钒、铌、钽及其合金的电子束焊

难熔金属厚板焊接最有前途的焊接方法就是电子束焊。电子束焊的焊接速度可高达 41 mm/s（大约 150 m/h）。通常真空室内的压强必须在 1.33×10^{-2} Pa 以下。真空度降低会导致焊接接头质量严重降低，首先是塑性、韧性明显变坏。

电子束焊的热影响区宽度只有氩弧焊的三分之一。两种方法的冶金过程大体相似。

合金中杂质含量高时，焊缝可能出现气孔、裂纹等缺陷。采用聚焦较细的电子束进行焊接可降低裂纹倾向。焊接前用散焦电子束预热坡口有助于防止气孔发生。电子束焊的大体焊接规范见表 4.10-9。

表 4.10-9 钒、铌、钽及其合金电子束焊的大体焊接规范

金属	厚度/mm	束流/mA	加速电压/kV	焊速/$m\cdot h^{-1}$
V	0.5	25～30	17.0～17.5	20～30
	1.0	60～67	12.5～12.9	60
	2.0	90～100	12.5～13.5	60
Nb	0.8	40	23	26
	1.0	65～70	17.0～17.5	30
	1.5	85	27	30
Ta	0.5	60	18	26
	1.0	80	18	50

3.4 钒、铌、钽及其合金的其他焊接方法简述

1）扩散焊在真空度优于 1.33×10^{-2} Pa 的压强下进行，可以采用高频感应加热，建议焊铌的焊接规范如下：焊接温度 1 250℃，压力 14.7 MPa，持续时间 5 min。为了降低焊接温度以减轻扩散焊时晶粒长大倾向，可在金属表面真空喷涂过渡层金属，焊铌时可以用镍作为中间层，其焊接规范如下：焊接温度 1 000℃，压力 19.6 MPa，持续时间 30 min。接头强度能达到母材强度的 90%。钽的扩散焊规范为：焊接温度 1 650℃，压力 11.8 MPa，持续时间 20 min。

扩散焊还可以用于连接异种难熔金属或其合金，如：铌合金＋钽合金或钼合金，甚至可与钛合金连接。铌与钢也能在真空中可靠连接。

2）电阻焊如点焊和缝焊这类金属及合金时，会遇到电极烧化的严重问题。在被焊零件表面覆盖如石墨等隔层能有效减少电极烧化的倾向。加一层钨或钨－铼合金也很有效。点焊和缝焊时也有必要采用惰性气体保护。

3）钎焊铌和钽时应注意它们在加热时极易氧化或吸收氮、氢等气体。钽及其合金的钎焊必须在高纯度惰性气体或



高真空中进行。由于它们常用于要求耐腐蚀的场合，因而钎焊所用的钎料也必须是耐腐蚀的，而高温下工作的接头，则其钎料又必须具有高温力学性能。

低温钎焊可采用镍基钎料（如镍钴硅合金），但钽和镍有形成脆性金属间化合物的倾向，只能在低于 982℃工作的条件下使用。高温钎焊可以采用钽钒钛钎料和钽钒铌钎料，表 4.10-10 和表 4.10-11 是用于不同温度下工作的钎料。表 4.10-10 钎料的钎焊要在压强低于 0.013 Pa 的真空室内进行，表 4.10-11 钎料的钎焊更需要在高真空条件下进行。

表 4.10-10　用于钽合金工作温度低于 1 371℃的钎料

钎料成分(质量分数)/%	温度/℃	
	钎焊	重熔
Ta10 - V40 - Ti50	1 760	2 399
Ta20 - V50 - Ti30	1 760	2 399
Ta25 - V55 - Ti20	1 843	2 204
Ta30 - V65 - Ti5	1 843	2 399
Ta5 - V65 - Nb30	1 816	2 299

续表 4.10-10

钎料成分（质量分数）/%	温度/℃	
	钎焊	重熔
Ta30 - V65 - Nb5	1 871	2 299
Ta30 - V40 - Nb30	1 927	1 999
Ta25 - V50 - Nb25	1 871	2 499

表 4.10-11　用于钽合金工作温度低于 1 927℃的钎料

钎料成分（质量分数）/%	钎焊温度①/℃	扩散处理		重熔温度/℃
		温度/℃	时间/h	
Hf93 - Mo7	2 093	2 028	0.5	2 238
Hf60 - Ta40	2 193	—	—	2 093
Ti66 - Cr34	1 482	1 427	16	2 082
Ti65 - V30 - Be4	1 316	1 121② 1 316	4.5 16	2 093

① 在该温度保持 1 min。
② 复合热处理。

编写：包芳涵（清华大学）



第 11 章　稀贵有色金属的焊接

1　稀贵有色金属的特点

稀贵有色金属一般指银、金及铂族金属（铂、铑、钌、锇、铱及钯等）世界上产量稀少而又十分贵重的金属。这些金属元素虽然十分昂贵，但它们具有其他元素所无法取代的特殊性能，所以在工业上和日常生活中也还有很多的应用。

它们优异的抗腐蚀性使零件的寿命延长很多，尽管初次投入成本较高，却由于不易损坏而实际上相对降低了成本。所以它们除用于首饰、工艺品及铸造货币外，在电子工业、电器设备、化学工业等领域也有不少的应用。电子设备中，火花塞电极要使用含钍的铂合金，热敏电阻引线要用到铂和银，陶瓷电容器电极要用到金或铂，电阻温度计传感元件是超纯的铂制成的。化学工业中，氧净化系统中的隔板是纯银制造的，人造丝喷丝嘴是铂与金的合金，高温 H_2S 容器是用铂或金制成的。

银、金及铂的主要物理性能见表 4.11-1。

表 4.11-1　银、金、及铂的主要物理性能

金属	密度 /g·cm^{-3}	熔点 /℃	热导率/W·(m·K)$^{-1}$	电阻率 /μΩ·cm	伸长率 /%	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa
银	10.55	960.8	422.8	0.147	硬态 3～4 软态 50	硬态 196～392 软态 127～157	硬态 304 软态 55
金	19.32	1 063	318①	2.065	退火态 39～45	134	—
铂	21.37	1 769	74.1	9.81	30～40	150	—

① 原文为 31，疑为 318 之误。

2　稀贵有色金属的焊接性

银、金、铂等稀贵有色金属在常温条件下都具有优异的抗腐蚀性。总体而言，它们都具有良好的焊接性和钎焊性。

银在 200℃以上开始氧化，其中含有某些合金元素（如铝、铜、锌、锡）的银合金的氧化倾向极大，而且其氧化可达到表面以下，深入内部。银的热导率极高，焊接时必须采用加热最为集中的热源或者事先预热到较高温度，以保证加热速度。银的热膨胀系数很大，焊接过程中产生应力及变形的程度也大，在接头形式和夹持方法上要加以注意。此外，氧在银中的溶解度在液—固态转变时差异极大，析出的氧容易造成气孔，在焊接工艺上要采取措施加以避免。

纯金的抗氧化性能很好，所以焊接或钎焊加热时并不发生氧化问题，不过含有合金元素时还是需要注意氧化问题的。

铂及其合金具有很高的化学稳定性，即使在高温下也有很好的抗氧化性，所以焊接时氧化不是问题。但如果铂及铂合金被碳污染就会变脆。所以在高温熔融状态下不能与碳接触，同样也要避免在还原性气氛中焊接。

3　银及其合金的焊接

3.1　银及其合金的熔化焊

钨极氩弧焊时由于没有溶剂的作用，应注意焊前将焊件表面清理干净，以免污染焊缝。电源采用直流正接。手工钨极氩弧焊的工艺参数见表 4.11-2。

表 4.11-2　纯银手工钨极氩弧焊的工艺参数

焊件厚度 /mm	坡口形式	钨极直径 /mm	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	氩气流量 /L·min^{-1}	平均焊速 /m·h^{-1}
1.0	卷边对接	2.0	—	50～70	3～4	4～5
1.5	对接	2.0	2.0	80	4～5	4～5
2	对接不留间隙	2.0	2.0～3.0	120～130	6～8	4～5
3	悬空对接不留间隙	3.0	3.0	150～160	8～10	5～7
4	对接	3.0	3.0	120	6～8	4～6

钨极氩弧焊时，接头力学性能比较可靠，高于气焊的接头。但氩气流量必须适当，流量过小可能造成焊缝气孔和表面氧化，流量过大则电弧不稳，也会造成表面氧化。银合金液态流动性好，要注意防止烧穿和溢流，最好采用衬垫或反面氩气保护，这样可实现良好的双面成形。

直径 55～155 mm，壁厚 2～3 mm 银管对接手工钨极氩弧焊时，坡口角度 60°，钝边 0.5～1 mm，不留间隙。焊前预热而且焊接过程中保持工件在 500～600℃，焊接电流为 90～180 A，焊缝经两道焊成，第一道不加填充焊丝，形成良好的根部焊道，焊第二道时填充直径 2～3 mm 的焊丝并稍作横向摆动，此时规范为：焊接电流 90～150 A，电弧电压 15～20 V，焊速 4～6 m/h，氩气流量 10～12 L/min，可以获得良好的焊缝成形。

气焊时采用中性或弱碳化性氧－乙炔火焰进行，火焰功率按板厚每 mm 消耗可燃气体 100～150 L/h 选取。气焊时一般要使用焊剂，可采用一半硼砂加一半硼酸，再与水及乙醇混合形成的膏状焊剂，其效果良好。为达到快速加热，应尽可能采用强规范，而且要用左向焊操作以加强对坡口的加热。不过，气焊时容易出现焊缝气孔等缺陷，质量不易稳定，接头性能也不大可靠。

其他如熔化极氩弧焊、电子束焊、激光焊等方法，只要其焊接过程稳定，保护良好，都可以用于焊接银及银合金，获得满意的结果。几种不同熔焊方法获得的银的焊接接头力学性能见表 4.11-3。

表 4.11-3　银熔焊接头力学性能

焊接方法	σ_b/MPa	δ/%	α/（°）
气焊	116.7	14.5	67
熔化极氩弧焊	58.9	4.5	—
交流钨极氩弧焊	132.4	21.3	180
直流钨极氩弧焊	138.3	23.8	180
可调气密室焊接	157.9	24.5	180

注：母材为质量分数 99.99% Ag，间隙 2 mm。

3.2　银及其合金的压力焊

冷压焊适用于银的焊接，因为银的塑性极好、易于在室温下经受压力而变形。焊前将银的表面严格清理干净，在室温下通过加压使之产生 65%～80% 的变形（或使其面积增大至初始面积的 150%～200%），即可形成良好的连接接头。如果适当进行低温加热，有助于表面间的扩散，则连接强度



更好。

电阻焊不适合于银的焊接，因为银的电阻极低，难于实现电阻加热，但有时银与磷青铜、银与黄铜或银与铜镍合金等组合的接头可采用凸焊的方法连接（如继电器或电气开关中的银触点）。

3.3 银及其合金的钎焊

3.3.1 银及其合金的硬钎焊

银及其合金的钎焊性良好。质量要求严格的电子产品常用真空钎焊，真空钎焊使用的银基钎料如表 4.11-4 所示。

表 4.11-4 真空钎焊用银基钎料

牌 号	主要成分（质量分数）/%				熔化温度/℃
	Ag	Cu	Sn	In	
BAg72Cu－V	72±1.0	28±1.0	—	—	779
BAg50Cu－V	50±0.5	50±0.5	—	—	779～850
BAg61CuIn－V	余量	24±0.8	—	15±1.0	625～705
BAg63CuIn－V	余量	27±0.8	—	10±1.0	660～730
BAg60CuIn－V	余量	30±0.8	—	10±1.0	660～720
BAg59CuIn－V	余量	31±0.8	10±0.8	—	600～720

采用其他方加热方法（如火焰、电阻、电炉等）进行银及其合金的钎焊时，为了保护工件，改善润湿条件，需要使用适当的钎料和钎剂。常用银基钎料主要成分除银之外，就是铜、锌及镉等，其熔化温度大多在 500～700℃之间。钎剂的主要成分则是一些硼化物及氟化物。适用的钎料和钎剂分别见表 4.11-5 及表 4.11-6。

表 4.11-5 银基钎料

牌 号	主要成分（质量分数）/%				熔化温度/℃
	Ag	Cu	Zn	Cd	
BAg70CuZn	72±1.0	26±1.0	余量	—	730～755
BAg65CuZn	65±1.0	20±1.0	余量	—	685～720
BAg50CuZn	50±1.0	34±1.0	余量	—	688～774
BAg45CuZn	45±1.0	30±1.0	余量	—	677～743
BAg50CuZnCd	50±1.0	15.5±1.0	16.5±2.0	18±1.0	627～635
BAg35CuZnCd	35±1.0	26±1.0	18±2.0	21±1.0	605～702

表 4.11-6 银及其合金硬钎焊用钎剂

牌 号	成分（质量分数）/%	钎焊温度/℃
QJ101	$H_3BO_3$30，$KBF_4$70	550～850
QJ102	KF（无水）42，$KBF_4$23，$B_2O_3$35	600～850
QJ103	$KBF_4$95，$K_2CO_3$5	550～750

3.3.2 银及其合金的软钎焊

银及其合金软钎焊时常常采用各种不同成分比例和不同熔点的锡铅钎料。各种不同的加热方法也都可以采用。在空气中钎焊时，一般用松香酒精溶液当作钎剂就可以了。

4 金及其合金的焊接

纯金具有极好的延展性、耐腐蚀性和抗氧化性，电阻率很低，热导率很高，熔点又比较低，所以纯金是容易焊接或钎焊的。金在焊接或钎焊时一般不会有氧化的问题，不过含有某些合金成分时，在焊接加热条件下则可能产生氧化问题。

与金组成合金的元素主要有：Co、Ni、Ag、Cr、Y、Cu、Mn 等，工业上常用的是 Au－Ni、Au－Cu、Au－Cr 等金合金。

4.1 金及其合金的熔焊

各种熔焊方法对金及其合金都比较适用，因为氧化问题不是很大。

由于金及其合金熔点低，气焊是可以采用的焊接方法，通常用稍具还原性的火焰，小功率的焊炬即可。由于需要的火焰温度和功率不高，除氧－乙炔火焰外，还可以采用氧－煤气或空气－煤气的火焰焊接金及其合金。气焊时，填充金属成分最好与母材相同或相近。如果使用焊剂可用硼酸或硼砂，也可以两者混合使用。

钨极氩弧焊、等离子弧焊、电子束焊、激光焊等熔焊方法也适用于金及其合金，而且效率高，质量好。

4.2 金及其合金的压焊

由于金及其合金具有极好的延展性，所以冷压焊、热压焊或摩擦焊都可以用于它们的焊接。只要焊前清理好连接表面，变形量足够大（20%），就能形成很好的冷压焊接头。

金铜合金、金铜银合金、金铜镍合金等可以采用电阻焊连接，不过电极须用钼制作，而不能用一般的铜电极。

4.3 金及其合金的钎焊

金及其合金硬钎焊加热可采用火焰、电阻、高频或炉内加热等各种方法。火焰加热时可调节成中性或还原性火焰。不同熔点及不同颜色的金合金用钎料见表 4.11-7。

表 4.11-7 金合金用典型钎料

金合金类型	成分（质量分数）/%					熔点/℃	备注
	Au	Ag	Cu	Zn	其他		
10K（软）	42	24	16	9	Cd9	700	黄色
10K（硬）	42	35	22	1	—	745	黄色
14K（软）	58	18	12	12	—	755	黄色
14K（硬）	58	21	15	6	—	800	黄色
10K（软）	42	30	8	15	Ni5	730	白色
10K（硬）	47	15	35	—	Sn3	775	牙科
	62	17	15	4	Sn2	810	牙科
	65	16	15	4	Sn2	800	牙科

在半导体及微电子器件中，金常被用作陶瓷、玻璃或金属表面的镀层，用于导电，因而时常需要进行软钎焊。质量分数为 Sn60%，Pd40%的钎料是能够迅速扩散并与金形成合金化的钎料。In95%，Bi5%的钎料和 Sn53%，Pd29%，In1.7%，Zn0.5%的钎料也适用。钎剂可采用松香型，焊后必须在乙醇或氯化烃溶剂中洗净残留钎剂。

5 铂及其合金的焊接

亮白色塑性很好的贵金属铂，熔点较高（1 769℃），抗氧化能力极强，在熔点温度以下不会发生氧化。铂的化学稳定性极好，不会被任何单一的酸所腐蚀。在高温条件下，碳会溶解于铂，温度降低时，碳又会析出，这将使铂变脆。所以铂在熔融状态不能与碳接触，也不宜用还原性氧－乙炔火焰加热。

铂通常与其他铂组元素（铼、钯、铑、钌等）组成合金，提高强度。由于它们具有良好的高温抗氧化能力，所以焊接和钎焊比较容易。用于电器产品的铂与镍、钨的合金却因含有镍、钨而在高温下可能氧化，焊接时必须注意。

5.1 铂及其合金的熔焊

很多种熔焊方法都能用于铂及其合金的焊接，常用的方



法有气焊、氩弧焊、电子束焊等。

气焊时最好采用氧-氢火焰气焊，就用铂作为填充金属，不需要使用焊剂保护，焊接质量良好。如采用氧-乙炔火焰气焊，必须将火焰调节成氧化性，以免使铂渗碳脆化。

铂的钨极氩弧焊参考规范参数见表4.11-8。对于某些铂合金，焊接电流过大会造成结晶裂纹，如0.5 mm厚的Pt15-Pd5-Ru合金，可在焊接电流≤20 A，电弧电压12 V，焊接速度9.6 m/h的条件下获得无裂纹的焊接接头。

表4.11-8 铂钨极氩弧焊规范参数

板厚/mm	焊接电流/A	焊丝直径/mm	氩气流量/L·min^{-1}
0.3	20	1.0	3
0.5	25~30	1.0	4
0.6	30~40	1.0	4
0.7	30	1.0	4
1.0	40~45	1.0	4.5

铂在真空电子束焊时应注意，在高温、高真空下，铂可能使氧化铝、氧化硅还原而铂本身被铝、硅污染，因此要避免与氧化铝、氧化硅接触。

5.2 铂及其合金的压焊

表面清理干净的铂工件，在空气中加热到982~1 204℃的温度范围，可以形成连接，实现锻焊或热压焊。一些厚度或直径很小的微细零件可以采用电阻焊连接。

5.3 铂及其合金的钎焊

铂硬钎焊时可采用纯金、金-铂合金、金-钯合金或纯银为钎料。因抗氧化性强，一般可不加钎剂。如果要求钎料与铂的颜色相匹配，可选用含铂质量分数为20%~30%的金合金钎料，其中的铂还能够提高钎料熔点、强度及硬度。

用于启闭电路元件的铂及其合金触头真空钎焊时大多使用银基、铜基、金基或钯基钎料，如果是在非腐蚀介质中使用的铂触头，则完全可以采用无氧纯铜钎料，价格便宜、工艺性能也更好。

铂软钎焊可采用一般常用的铅-锡钎料，钎剂可用磷酸和乙醇的混合液。

编写：包芳涵（清华大学）



第12章　异种金属焊接

1　概述

异种金属所涉及的范围很广。它包括了不同纯金属之间的焊接，不同基体金属之间的焊接（如铝合金与钢）以及具有同一基体但成分、组织和性能有显著差别的合金之间的焊接，如异种钢焊接。此外，还包括采用异种填充材料的同种金属焊接，如用奥氏体钢焊条焊接易淬火钢、以及带有复合层金属材料的焊接，如不锈钢与碳钢复合板的焊接，和特殊性能表面层的堆焊。

1.1　异种金属焊接性特点

焊接是一种冶金结合。两种不同金属形成冶金结合时的主要问题除了同种金属焊接时的一些常见的焊接性问题外还有一个需要考虑的特殊问题，即冶金相容性。为使两被焊金属结合成整体，并使连接处没有缺陷以及具有足够的强度和所需的物理、化学性能，必须采取一定的工艺措施（如加热、加压和熔化）使被焊金属连接处的原子接近到足以发生物理化学过程的程度；通过诸如熔化、扩散、互溶、化学反应、结晶和再结晶等一系列物理化学过程，在连接处建立一定的冶金学关系，如形成共同的晶粒，生成固溶体和化合物等。同种金属焊接时由于被焊金属具有完全相同的物理化学特性和组织结构，因此它们的冶金相容性非常好；无论采用何种焊接方法都能得到具有被焊金属相同或类似成分、组织和性能的结合区（焊缝）。反之，异种金属焊接时由于被焊金属具有不同的物理化学性能和组织结构，因此焊接时需根据其冶金相容性的特点，采取相应的工艺手段（如采用钎焊和加中间层的扩散焊）创造条件，促使焊接区内进行有利于结合的物理化学过程，以便获得性能满意的接头。

异种金属焊接时在连接部位（焊缝）将形成成分、组织和性能完全不同于被焊金属的合金。此时，焊缝的成分、组织和性能主要取决于参与组成焊缝的各部分金属（被焊材料和填充材料）之间的比例。这种比例与所用的焊接方法和焊接工艺参数有关。因此，异种金属的焊接性除与被焊金属所固有的物理化学特性有关外，在很大程度上还取决于焊接方法和工艺。两种金属均为纯金属时，焊缝中形成的合金较为简单，为二元合金。当被焊金属为两种不同系统的合金时，则焊缝中形成的合金将变得极为复杂，成为多元系合金。为了解两种异种金属及其合金焊接时可能进行的物理化学过程及其冶金相容性、即焊缝内和界面上可能形成的相结构（固溶体和化合物），可以通过两异种金属的物理化学特性和所形成的二元相图来进行分析。当焊接区内生成固溶体时，其冶金相容性好，原则上的焊接性也较好；当生成脆性金属间化合物时，其冶金相容性就差，原则上的焊接性也较差。其焊接性随焊接区脆性的增加而变坏。两种金属的晶格类型、原子半径、电负性和原子价等是影响其合金相结构的主要因素。晶格类型相同的金属能形成无限固溶体，其冶金相容性最好，如铜和镍均为面心立方晶格，能形成无限固溶体。晶格类型相同的金属即使不形成无限固溶体，其溶解度也大于晶格类型不同的金属，如体心立方晶格的锰、钨、钒、铬等，在体心立方 α－Fe 中的溶解度比面心立方的 γ－Fe 中的溶解度大。当两金属的原子半径相差不大时可能形成无限固溶体，相差越大，则溶解度越小。两金属的电负性决定了它们之间的化学亲和力，当两金属的电负性相差越大，则它们之间的化学亲和力越强，生成化合物的倾向越大，相反，对生成固溶体越不利，而且溶解度越小。此外，溶质金属的原子价越高，所形成固溶体的溶解度越小，如在一价的面心立方银中，二价镉的溶解度（摩尔分数）为 42％三价铟为 20％，四价锡为 12％，五价锑为 7％。两种金属在形成有限固溶体的同时，当超过固溶度后还可形成晶格结构不同于该两种金属的新相（金属间化合物）。金属间化合物通常具有较高的熔点、较高的硬度和较大的脆性。当合金中生成金属间化合物时，其强度、硬度及耐磨性提高，而塑性降低。它是许多合金中的重要组成相。根据其结构特点，金属间化合物又可分为多种类型，它们对金属性能的影响取决于其脆性、含量、形态和分布特点等。当其脆性过大，含量过多，呈连续分布时，对合金性能不利，导致焊接性严重恶化。这是异种金属焊接时的一个重要问题。金属化合物的脆性与其类型有关。其形成也受原子尺寸、电子浓度和电负性等因素的影响。

由于相图反映了两被焊金属之间的冶金相容性及其焊接性，因此可以根据相图的类型，并结合焊接工艺对异种金属的焊接性特点进行分析。当形成偏晶相图的两种金属焊接时由于其液态时仅为有限溶解（如 Cu－Pb），或甚至几乎完全不溶解（如 Fe－Pb），因此二者的冶金相容性很差，无法采用熔化焊。相反，形成匀晶相图的两种金属（见图 4.12-1a）在液态和固态时都能无限固溶（如 Cu－Ni），因此其冶金相容性很好，原则上具有类似于同种金属焊接时的焊接性。当两种相互有限固溶并形成共晶或包晶的异种金属焊接时，由于其形成的相图为共晶（见图 4.12-1b）或包晶（图 4.12-1c），因此熔化焊焊缝中存在由两种有限固溶体组成的双相组织，并具有共晶或包晶特点。但其无论是共晶或包晶均为固溶体，因此这类异种金属的焊接性也较好。但当两种金属的相图中出现金属间化合物时（图 4.12-1d），其焊接性与化合物的量有很大关系。焊缝中的化合物量可以通过相图根据不同焊接工艺条件下所得焊缝的成分来确定。因此，在选择焊接工艺时应该根据相图，将两种金属在焊缝中的量控制在不产生大量金属间化合物的范围内，以免接头脆化。实际中，异种金属的焊接能否顺利进行，除主要取决于它们的冶金相容性外，还与其物理性能，熔点、热膨胀系数以及导热、导电和导磁性等是否匹配有关。例如最常遇到的两种膨胀系数相差大的

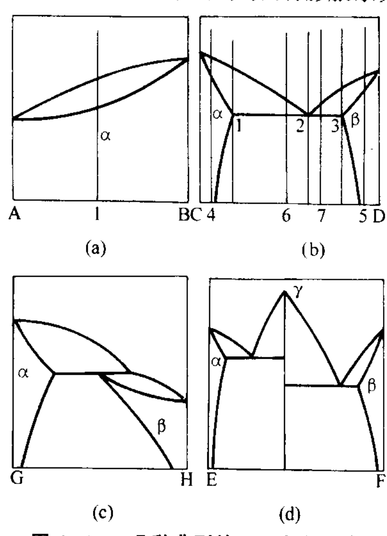


图 4.12-1　几种典型的二元合金系统



金属焊接时，会在接头中产生很大的热应力，而使其使用性能下降，甚至产生裂纹。而且这种热应力是无法采用热处理消除的，只能在焊接接头中加入第三种金属（如填充金属、中间层金属或过渡接头）来调整。又如当两种被焊金属的导电导热性能相差很大时，很难采用电阻焊方法。如电阻点焊冶金相容性很好的铜和镍时，应能形成很好的冶金结合，但由于它们的导热导电性能相差很大而使点焊时熔核偏向导电导热差的镍，因此必须采取特殊的工艺措施来进行调整，如在导电导热好的铜一侧采用特殊材料的电极（如端部嵌有钨的复合电极），或在电极与被焊铜之间加入工艺垫片（导热性差的金属）。

1.2　异种金属焊接的冶金问题

1.2.1　异种金属焊接区的形成特点及其成分、组织的不均匀性

焊接区是连接两种被焊金属的冶金结合区，同时也是由一种金属过渡到另一种金属的过渡区。当两种金属在不加填充材料或中间层材料的直接焊接时，焊接区将完全由两种被焊金属形成。其成分、组织特点与两被焊金属形成合金时的相图有关和工艺有关。熔化焊和扩散焊由于加热到的温度不同和形成冶金结合的机制不同，而使其焊接区的成分、组织特点也不同。熔化焊的焊接区是由两种熔化的液态金属混合后形成的具有明显凝固组织特征的焊缝。扩散焊的焊接区为固态下通过界面上的相互扩散形成的跨越原接触界面的相互扩散区，即扩散焊焊缝。以最简单的能无限固溶的两种金属A与B和形成较为复杂的有限固溶体及其共晶体的两种金属C与D的焊接为例。图4.12-1a为两种无限固溶的金属A与B的相图。这两种金属在固态下加压和加热扩散焊时所得扩散区（焊接区）的组成很简单，为单一的α固溶体区。但其成分是不均匀的（如图4.12-2a）。但其成分变化是连续的，由100%到0。当两种能形成有限固溶体和共晶体的金属C与D在低于共晶温度的固态下扩散焊时，焊接区的组成较为复杂。根据金属C、D的相图（图4.12-1b），在被焊金属C与D的接触界面上，通过相互扩散，在C金属侧形成D元素在C中的固溶体α，而在D金属侧形成C元素在D中的固溶体β。此时，扩散区（即焊接区）由靠近C侧的α固溶体层和靠近D侧的β固溶体层组成。而且在每一个固溶体层中溶质元素的分布是不均匀的。在两固溶体层的交界面处溶质元素的浓度最高可以达到它在该温度下的溶解度，向内逐步减少直至与母材交界处为零。而且在由一种固溶体进入另一种固溶体的界面处，发生成分的突变（见图4.12-2b）。结合图4.12-1b与图4.12-2b可以看到，假如界面处β相的成分达到5，α相的成分达到4，则界面上D元素的浓度由β相中d_5突然降到α相中的d_4。同样，C元素的浓度在界面上由α相中的c_4突然降到β相中的c_5。由此可见，当两种被焊金属形成的相图不同时，其焊接区的组成和成分的均匀性是不同的。当两种金属形成无限固溶体时，焊接区由单一的固溶体α组成，而且焊接区内成分变化是连续的。但当两种被焊金属形成的相图为有限固溶体及其共晶体时，则焊接区的组成和成分变化较为复杂。焊接区由两层不同的固溶体（α和β）组成，并在两层固溶体的界面上出现成分的突变。因此固态扩散焊时，其焊接区的组成和成分变化与两种被焊金属的相图密切相关。如果相图上还有金属间化合物，则在焊接区中还可能出现金属间化合物层。这对焊接接头的性能很不利。为避免金属间化合物层的产生，可选用适当的中间层材料和控制扩散焊工艺参数。

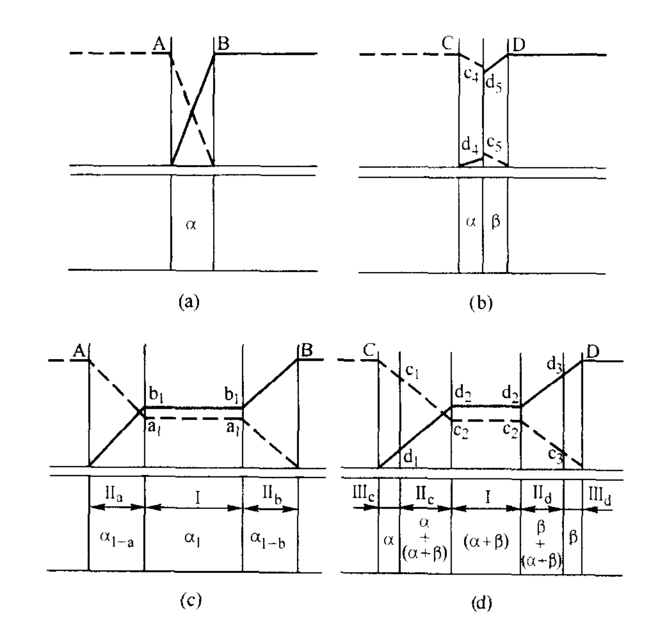


图4.12-2　焊接接头的组成和成分分布示意图

与固态扩散焊不同，熔化焊时的温度超过了两种被焊金属A、B的熔点，故其焊接区的形成机制和成分、组织也与扩散焊时不同。此时，焊接区是由两种熔化金属相互溶解后形成的液态合金凝固而成。故在不加填充金属的直接焊接或异种金属堆焊时，其成分取决于A、B两种金属的熔化量。此外，当两种金属的密度不同时还必须考虑到密度的影响。每种金属的熔化量可由其熔化面积F_A与F_B表示（见图4.12-3a）。此时，A、B两种金属在焊缝中所占体积比分别为$F_A/(F_A+F_B)$和$1-[F_A/(F_A+F_B)]$。当A、B两金属的密度分别为ρ_a和ρ_b时，可以得出焊缝中A、B两种金属元素的平均含量w(A)和w(B)如下：

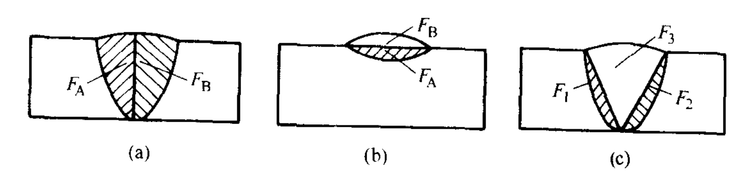


图4.12-3　焊缝金属各部分的面积

$$w(\mathrm{A})=[\rho_a F_A/(\rho_a F_A+\rho_b F_B)]\times 100\ (\%)$$
$$w(\mathrm{B})=\{1-[\rho_a F_A/(\rho_a F_A+\rho_b F_B)]\}\times 100\ (\%)$$

由此可见，当被焊金属确定后，凡是影响F_A与F_B之比的因素都会改变焊缝金属的成分。如图4.12-3b所示电弧堆焊时改变工艺参数（电流和电压）能引起F_A和F_B的比发生变化，从而达到调节堆焊金属的成分。此外，当熔点或导热性能相差大的两种金属进行不加填充金属的焊接时，其焊缝将偏向熔点低或导热性能差的金属，从而影响到焊缝的成分、组织和性能。

根据两被焊金属的相图，并利用两被焊金属熔化面积和密度计算得出的焊缝平均成分，就能确定其焊缝的组成。当A、B两种金属能形成连续固溶体时，其焊缝的组织很简单，与两种金属的熔化量无关，即与两种金属在焊缝中的含量无关。其组织始终是单一的α固溶体。但其成分与两种金属的



熔化面积之比有关。假如根据它们熔化面积之比及其密度求得的焊缝平均成分为相图 4.12-1a 上的 1，但实际上焊缝各处 α 固溶体的成分并没有都达到平均成分。一般情况下，焊缝中部的成分较为均匀，接近平均成分，焊缝边缘为不均匀混合区，越靠近母材，成分就越接近母材。图 4.12-2c 为形成连续固溶体的 A、B 两种金属的熔化焊焊缝组成及其成分分布曲线。由此可见，两种能无限固溶的金属 A、B 在不加填充材料的情况下进行熔化焊时，焊缝为单一的 α 固溶体，但其成分不均匀。焊缝中部均匀混合区 Ⅰ 内，α 的成分为平均成分 1，以 α_1 表示；靠近材 A 的不均匀混合区 $Ⅱ_a$ 内，离母材 A 越近，α 中 B 元素的含量越低，A 元素的含量越高，其成分变化范围为由 1 到 A，以 α_{1-a}表示；同样，在靠近母材 B 的不均匀混合区 $Ⅱ_b$ 内，离母材 B 越近，α 中 A 元素的含量越低，B 元素的含量越高，其成分变化范围为由 1 到 B，以 α_{1-b}表示。当两种被焊金属形成的相图较复杂时，其熔化焊焊缝的组织和成分分布、也较复杂。如将生成有限固溶体和共晶体的两种金属 C 与 D（见图 4.12-1b）进行不加填充金属的熔化焊时，焊缝均匀混合区的成分和组织与两种金属的熔化面积之比有关。如计算所得的焊缝平均成分相当于图 4.12-1b 上的成分 6，则焊缝均匀混合区的组织应为少量 α + 共晶体（α + β）。如计算所得的焊缝平均成分刚好处于共晶成分 2，则焊缝中部均匀混合区的组织全部是共晶体（α + β）。但若其计算平均成分为 7，则焊缝中部均匀混合区的组织除共晶体（α + β）外，还将出现少量 β。因此，这种合金系统中，焊缝均匀混合区内的组织与两种母材的熔化面积比有关，因为它决定了焊缝的平均成分。从图 4.12-1b 可见，焊缝均匀混合区的组织可以有三种类型：平均成分处于亚共晶区时（如成分 6），为 α + 共晶体（α + β），处于共晶成分时（如成分 2），全部为共晶体（$\alpha+\beta$），处于过共晶区时（如成分 7），为 β + 共晶体（$\alpha+\beta$）。根据图 4.12-1b 上的相图，焊缝不均匀混合区内的成分和组织的变化较复杂，焊缝两侧存在两个不均匀混合区。其成分和组织不同，而且每个不均匀混合区内又包括两层不同的组织。一层紧靠母材，另一层紧靠焊缝中部的均匀混合区。如图 4.12-2d 所示，焊缝中部为均匀混合区 I，母材 *C* 侧的不均匀混合区又分为 $Ⅱ_c$、$Ⅲ_c$ 两层，母材 *D* 侧的不均匀混合区分为 $Ⅱ_d$、$Ⅲ_d$ 两层。紧靠 *C* 的 $Ⅲ_c$ 区为 α 组织，其成分变化的范围由 1 到 *C*，紧靠 *D* 的 $Ⅲ_d$ 区为 β 组织，成分变化范围为由 3 到 *D*。但靠近焊缝中部的不均匀混合区（$Ⅱ_c$、$Ⅱ_d$）的组织较为复杂，与焊缝的平均成分有关。假如焊缝的平均成分刚好在共晶成分 2，则焊缝中部均匀混合区 I 的组织为共晶体（$\alpha+\beta$），*C* 侧的不均匀混合区 $Ⅱ_c$ 的组织为亚共晶组织 α + 共晶体（$\alpha+\beta$）。其成分变化范围由平均成分 2 到 1，其共晶体的量逐渐减少直至 0。另外，在 *D* 侧不均匀混合区 $Ⅱ_d$ 内的组织为过共晶组织 β + 共晶体（$\alpha+\beta$）、成分变化范围由 2 到 3，共晶体的量也是逐渐减少直至 0（见图 4.12-1b 和图 4.12-2d）。如焊缝平均成分不是共晶成分，则两侧不均匀混合区的组成将更为复杂。

由此可见，焊接区是一个成分、组织的不均匀体。其成分组织特点与两种被焊金属的组合及其物理化学性能和焊接工艺有关。当被焊金属和焊接工艺确定后，可以通过在焊接区内引入第三种材料，如填充金属和中间层金属来调整焊接区的成分和组织结构，以便达到改善性能的目的。此时熔化焊焊缝的成分将取决于三种金属的熔化量（见图 4.12-3c）以及三种金属的成分。当三种金属为三种不同合金时，焊接区成分将变得非常复杂。此时，焊缝中每种元素的平均含量为：

$$w(X)_w=\rho_1 D_1 w(X)_1+\rho_2 D_2 w(X)_2+\rho_3 D_3 w(X)_3$$

$$D_1=F_1/(F_1+F_2+F_3);\quad D_2=F_2/(F_1+F_2+F_3);$$
$$D_3=F_3/(F_1+F_2+F_3)$$

其中，$w(X)_w$ 为某元素 X 在焊缝中的平均质量分数（%），$w(X)_1$ 和 $w(X)_2$ 分别为某元素在被焊合金 1 和 2 中的质量分数（%），$w(X)_3$ 为某元素 X 在填充合金 3 中的质量分数（%）；ρ_1 和 ρ_2 分别为被焊金属 1 和 2 的密度，ρ_3 为填充金属 3 的密度，D_1 和 D_2 分别为被焊金属 1 和 2 在焊缝中所占的比例，D_3 为填充合金 3 在焊缝中所占的比例。

1.2.2　异种金属焊接中的界面扩散

界面扩散是异种金属焊接中的一个重要的物理化学过程。在不同条件下扩散过程所起的作用不同。在扩散焊时，它对形成焊接区起着决定性的作用，因此要创造条件促使扩散过程的进行。而熔化焊时它可能影响到熔合区的两侧成分、组织和性能的不利变化和焊后热处理或高温工作时的组织稳定性，以及由此引起的焊接接头性能下降。这是异种金属焊接时需要极力避免的界面扩散问题。如异种钢熔化焊时，焊缝熔合区两侧形成的渗碳层和脱碳层以及由此引起的接头强度和耐腐蚀性能下降。异种金属焊接中的扩散主要是互扩散，伴随有浓度的变化。

根据菲克定律，浓度梯度是产生物质扩散的依据。扩散过程中物质由浓度高的区域移向浓度低的区域，使其浓度逐步趋于均匀化。但并非所有扩散过程都能用浓度梯度来说明。如异种钢焊接接头中出现的碳原子的上坡扩散。碳原子由低浓度区向高浓度区扩散，使其浓度发生两极分化，造成增碳层和脱碳层。这是由于根据热力学理论，扩散是在化学位梯度的驱动下进行的；只有当系统中各组元的化学位在各处都相等时，该系统才达到热力学平衡。因此，如果化学位梯度方向与浓度梯度方向一致，则扩散由高浓度区向低浓度区进行。但若化学位梯度方向与浓度梯度方相反，则扩散由低浓度区向高浓度区进行，从而造成上坡扩散。

异种金属焊接接头中导致固态扩散的必要条件除扩散驱动力外，参与扩散的金属之间必须要有一定的固溶度。因为只有能溶入基体晶格的溶质原子才能在基体金属中进行扩散。因此，在用扩散焊连接两种固态下互不溶解的金属时，需要加入第三种能与两被焊金属都形成固溶体的中间层金属。此外，由于固态扩散是一种原子热激活过程，因此必须在超过一定温度后才能进行。该温度与扩散原子有关。例如碳原子在 100℃ 以上就能在铁中进行扩散；而且温度越高，原子的能量越大，扩散系数 *D* 越大，扩散就越快。例如将温度由 927℃提高到 1 027℃时碳在铁中的扩散系数 *D* 增大 3 倍，故碳的扩散速度也提高了 3 倍。因此，要抑制异种金属焊接接头中扩散过程的进行就必须控制加热温度。根据扩散系数 $D=Do\exp(-Q/RT)$ 公式，对扩散速度起决定性作用的 *D* 除与温度有关外，还与扩散常数 *Do* 和扩散激活能 *Q* 有关。但 *Do* 和 *Q* 与温度无关，主要取决于金属的物理化学特性。因此，影响扩散的因素除温度外，还有晶体结构、原子尺寸和合金成分等。

晶体结构中原子排列越紧密，原子间的结合越强。此时，扩散激活能 *Q* 越大，扩散系数 *D* 就越小，扩散越困难。如面心立方晶格的 γ－Fe 较体心立方晶格的 α－Fe 中的原子排列紧密，因此 γ－Fe 中原子的结合力强，扩散激活能高，扩散较 α－Fe 中困难。如碳在 α－Fe 中的扩散能力比 γ－Fe 中的大 100 倍。因此，在异种钢焊接接头中往往由于熔合线两侧的相结构不同而影响碳的扩散。晶体结构对扩散的影响还与它的各向异性有关。由于其不同晶面和晶向上原子排列的密集度不同，因此扩散系数也存在各向异性。另外，还有一种与晶体结构的完整性遭到破坏有关的“短路”扩散。在晶界上，在接近自由表面处和位错线邻近区域内，由于原子



排列不规则而使原子具有较高的能量，因此其扩散激活能较低。故晶界扩散激活能 Q 比体扩散的 Q 值低，而且表面扩散的 Q 值更低。因此，原子在多晶体中的扩散速度比单晶体中的大。而且晶粒越细，多晶体的扩散系数越大。但在间隙固溶体中，因间隙原子小易扩散，故其晶界与晶内的扩散系数差别不大。此外，由于晶界能量高于晶内，因此凡能降低界面能的溶质原子会扩散偏聚到晶界，使体系总能量降低；从而造成该原子在晶界上的浓度高于晶内浓度的"内吸附"现象。这也是一种上坡扩散，如 B 在 Fe 中会向晶界扩散富集，而使晶内贫化。这种现象在用含 B 钎料的钎焊接头中时有发生，使钎缝中的 B 向界面附近的母材晶界扩散富集。除晶界外，实际晶体中还存在位错管道。它也是原子扩散的有利通道，可使扩散激活能降低一半左右。而且位错对扩散的影响在低温下和较低浓度时更为突出。因此，增加位错密度对加速扩散有利。例如机械加工后的表面常有一很薄的加工硬化层，其中的晶体缺陷密度很高，降低了原子扩散的激活能，因此对扩散焊有利。但位错对间隙原子的扩散可能不利。当间隙原子落入位错中心或空位时自由能降低，因而可能会阻碍其扩散。

此外，金属的熔点高低也反映了金属内部原子间的结合强弱。因此，基体金属的熔点越高，原子结合越强，扩散激活能越大，扩散越困难。因此，高熔点金属之间的扩散焊较困难，而且熔点越高扩散焊越困难。另外，原子尺寸也会影响到它在固溶体基体金属中的扩散。在置换固溶体中原子尺寸相差越大，引起的晶格畸变就越大，固溶度越小，溶质原子扩散越容易，扩散激活能 Q 越小，而扩散系数 D 越大。同时，扩散还与溶质原子和固溶体的类型有关。在同一基体金属中，形成间隙固溶体的间隙原子的扩散激活能比形成置换固溶体的置换原子的扩散激活能要小得多。因此，碳在钢中的扩散速度比铬快，这就造成了不锈钢焊接热影响区内奥氏体晶界的贫铬层。

异种金属焊接接头中合金成分对扩散有很大影响。与二元系统不同，在多元系统中一种元素在基体中的扩散会受到基体中其他元素的影响。其影响与它们的物理化学特性有关。例如在钢中合金元素对碳的扩散产生不同的影响。根据公式 $J=-D\,(\mathrm{d}\mu/\mathrm{d}x)$，扩散通量 J 除与扩散系数 D 有关外，还与化学位梯度 $\mathrm{d}\mu/\mathrm{d}x$ 密切相关。因此，合金元素对碳在铁中扩散的影响除与扩散系数有关外，还与化学位梯度有关。凡是强碳化物形成元素，Cr、Mo、W 都能降低碳的活度，使碳的化学位降低。因此，C 在 Fe 中将由 Cr、Mo、W 等碳化物形成元素含量低的区域向碳化形成元素含量高的域扩散。相反，非碳化物形成元素，如 Co、Ni、Cu、Al 和 Si 都能增加 C 的活度，使碳的化学位提高，故 C 在 Fe 中将由非碳化物形成元素 Co、Ni、Cu、Al 和 Si 等含量高的区域向非碳化物形成元素低的区域扩散。因此，在异种钢焊接接头中，当熔合区两侧的合金成分不同时，碳将由非碳化物形成元素含量高以及强碳化物形成元素含量低的一侧向非碳化物形成元素含量低和强碳化物形成元素含量高的一侧扩散。其结果造成了异种钢焊接接头中碳的上坡扩散以及由此引起的熔合区两侧的增碳层和脱碳层。因此，异种金属焊接时可以通过调整合金成分来影响合金元素的活度以及与活度有关的化学位，从而控制合金元素在焊接接头中的扩散。

在异种金属焊接接头的界面互扩散过程中，当扩散原子在基体金属中的浓度超过其溶解度后，便会引起基体晶格的变化，形成金属间化合物的新相或另一种固溶体，从而使金属的扩散层分为两层。与界面直接接触的表面层为新相层，其后为扩散原子在基体金属晶格中的固溶体层。新相层的厚度随扩散温度和时间的增加而增加。这种扩散包括两个过程：一个是扩散过程，另一个是扩散原子达到一定浓度后生成新相的反应过程。这种伴随有新相产生的扩散称为反应扩散。由于有新相形成，因此反应扩散层中浓度的变化是不连续的。而且根据扩散原子和基体金属的相图，反应扩散可能形成不同成分的多种化合物层。每层之间的成分都有突变。这种反应扩散在焊接接头中极为普遍。由此产生的多种金属间化合物层会使接头变得很脆。例如铜－铝接头中，在150℃时开始反应扩散，形成 $CuAl_2$，350℃时出现 Cu_9Al_4 的附加层，400℃时在 $CuAl_2$ 与 Cu_9Al_4 之间出现 CuAl 层。当金属间化合物层的厚度增加到 3～4 μm 时，接头强度急剧降低。因此，焊接时需调整焊接工艺或采用中间隔离层来防止它的产生。例如在扩散焊钛与铁时为防止金属间化合物的产生可采用能与钛和铁都能互溶的钒作中间层。

1.2.3 异种金属焊接时的主要缺欠

缺欠是焊接接头中的一切不连续性、不完善性、不健全性和不均匀性等的泛指。超标的缺欠就是缺陷。直接与被焊金属的物理化学特性有关的冶金缺陷有裂纹、气孔、夹杂物和性能恶化等。异种金属焊接时由于它们的物理化学特性有差异，因此比同种金属焊接时更易产生缺欠。其中较为突出的是接合缺欠——裂纹和性能缺欠——硬化、软化、脆化、耐蚀性降低和疲劳强度下降等。同种金属焊接时成分基本是不会变化的；此时，引起性能恶化和产生裂纹的冶金因素主要是一些经焊接热作用后，产生的低塑性非平衡组织和焊接过程中进入焊接区的有害杂质。但在异种金属焊接时除了上述因素外，由于两种金属在形成冶金结合时，必然会在焊接区出现成分变化，生成新的合金。当两种被焊金属的冶金相容性不好时，不可避免地在焊接区内会出现一些不利的成分和组织；并导致焊接接头性能恶化以及形成一些对裂纹敏感的组织，如晶界低熔点共晶和脆性组织。而且异种金属焊接接头中的组织和成分变化是不均匀的，其不均匀程度及其对接头性能的影响与组成焊接区的合金系统，即合金相图，有关和焊接工艺有关。焊接工艺包括是否采用填充金属或中间层材料以及所采用的工艺方法和工艺参数等。如熔化焊时很易产生裂纹的异种金属，可采用加中间层的扩散焊工艺来进行连接。另外，引起裂纹的力学因素在异种金属焊接时也可能由于膨胀系数的差异而变得更为严重。同种金属焊接时的残余应力纯粹是由于加热不均匀和结构拘束度引起的。但异种金属焊接时的残余应力除以上原因外，还与它们的膨胀系数差别有关。因此，它不能通过焊接时的预热和改进结构设计来降低，也不能通过焊后热处理来消除。它不仅产生于加热集中的熔化焊，而且还产生于整体均匀加热的扩散焊和钎焊接头中。解决的办法是采用膨胀系数处于两种被焊金属之间的第三种金属作为填充材料或中间层材料和过渡接头。

异种金属焊接接头中的成分、组织和性能的不均匀性不仅产生一些降低接头力学性能的缺欠，如软化、硬化和脆化等；而且还会导致接头中的化学和电化学性的不均匀，因而在腐蚀环境下引起局部腐蚀以及在焊接内应力的共同作用下导致应力腐蚀开裂（SCC）。在异种金属焊接接头中不仅宏观上是由两种或三种（当有填充金属或中间层金属时）不同金属组成；而且微观上还能分成多个成分和组织不同的区域。由此引起的接头各部位的电极电位（腐蚀电位）是不同的，与电解液接触时形成了电偶腐蚀电池，使电位低的部位加速腐蚀，电位高的部位则受到保护。这种局部腐蚀称为电偶腐蚀。而且金属在不同介质中的腐蚀电位是不同的。当介质一定时，电位越负的金属越易成为阳极而被腐蚀。反之，电位越正的金属则越易形成阴极而不易被腐蚀。因此，在焊接两种腐蚀电位不同的异种金属时，通过选择适当的焊接材料或中间层材料来使焊接区的腐蚀电位介于两种母材之间。当异种金属焊接接头有 SCC 倾向时，凡能降低焊接残余应力峰值和拉应力区宽度的措施都有助于降低某 SCC 的倾向，



如选择膨胀系数处于两被焊金属之间的填充金属或中间层金属。另外，也可在与腐蚀介质接触的表面通过锤击或喷丸处理等手段造成压应力。异种金属焊接接头在温度周期性变化的条件下工作时，由于接头中各区域的热膨胀系数、弹性模量、屈服强度和裂纹扩展特性等不同而导致热疲劳的产生，降低接头的使用寿命。异种金属焊接接头中的化学成分不均匀性还可能会导致高温腐蚀。连接界面处的成分变化会使其在大气中高温工作时产生选择性氧化，并形成缺口，造成应力集中。在循环受热的条件下产生应力 - 氧化断裂。

1.3　异种金属焊接工艺特点

异种金属的焊接性主要取决于其固有的物理化学特性以及由此决定的冶金相容性。但焊接时可以通过工艺因素创造有利条件，如温度、压力及其他金属的引入，来控制和改变被焊金属之间的物理化学反应，以便减弱和抑制一些不利反应（如生成脆性金属间化合物）的进行；从而使其焊接性得到一定的改善。因此，与同种金属焊接不同，异种金属焊接时，焊接工艺的选择受到很大的限制。它主要取决于被焊金属的组合。当两种物理化学性能相近的金属（如异种钢）组合在一起焊接时，与同种金属的焊接基本相似。

各种焊接方法对异种金属焊接的适应性是不同的。熔化焊（包括各种电弧焊、电子束焊和激光焊等）是焊接中用得最广的一种焊接方法，但在焊接冶金相容性差的异种金属时受到了很大的限制。虽然它可以通过加入第三种金属，如填充金属和中间层金属来改善异种金属的焊接性，但其改善程度与被焊金属的冶金相容性和它们在焊缝中所占的比例（稀释率）有关。一般来说，低稀释率的熔化焊方法（如钨极氩弧焊）比高稀释率的（埋弧焊）有利于异种金属的焊接。但当两种被焊金属的冶金相容性很差时，即使采用低稀释率的焊接方法也无法获得合格的焊缝。因此，熔化焊主要适用于物理化学性能相差较小、冶金相容性较好的异种金属焊接，如异种钢焊接和钢与镍合金的焊接等；但它不适用于能生成大量金属间化合物的异种金属，如铝与钢、钛与钢和铝与钛等的焊接。为解决冶金相容性差的异种金属的焊接，可采用一种“间接熔化焊”法，即在一侧母材的连接面上预制一个隔离层或采用过渡段接头，避免了两种母材熔合在一起时的不良反应。

钎焊是一种对异种金属焊接适应性很强的连接方法。钎焊时母材虽然处于固态，但有时母材也会溶解，也会在界面处形成金属间化合物层以及由扩散引起的晶界渗入等脆化现象。只要钎料成分选择合适以及钎焊温度和时间控制恰当，这些不利的界面过程都能控制在允许的范围内。因此，钎焊能用于各类异种金属的焊接。另有一种介于熔焊和钎焊之间的方法，称为熔焊 - 钎焊（或称钎接焊）。其特点是，用熔化焊方法将低熔点母材熔化后的液态金属作为钎料与固态的高熔点母材形成结合。这就避免了高熔点母材熔化后与低熔点母材一起形成大量的金属间化合物而使其接头脆化。但这种方法的先决条件是低熔点金属熔化后必须能润湿高熔点金属。当然，也可以选择一种既适用于低熔点母材熔化焊，又能作为高熔点母材钎料的填充金属进行它们的熔焊 - 钎焊。但必须控制低熔点母材的熔化量，以免它对填充金属的过度稀释而影响到对固态高熔点母材的润湿。

压焊是在固态下施加一定压力，通过塑性变形使被焊金属表面接近到原子间产生结合力和互扩散。某些塑性好的金属甚至在室温下就能进行压焊，即冷压焊。此时，不存在被焊金属界面扩散和反应；接头中不存在热影响区，也没有金属间化合物的生成。但它要求金属的塑性很好，焊接时的变形量很大，如铜与铝搭接点焊的最小压缩率为 84%，而且接头的型式受很大限制，故应用很有限，常用于铝、铜导线的连接。扩散焊是压焊的一种主要形式。它在较高温度下通过少量的塑性变形，使两被焊面接近到原子间结合力作用的距离以内，通过原子互扩散，达到牢固的结合。一些互不相溶或在焊接时易产生金属间化合物等冶金相容性很差的异种金属，可采用加中间层的扩散焊来获得满意的连接。因此，它在异种金属焊接中得到了广泛的应用。此外，对接电阻焊、摩擦焊、超声波焊和爆炸焊等压焊方法都能用于异种金属焊接。与扩散焊不同，这些方法都是在瞬时加热、加压和快速变形条件下，通过界面扩散和再结晶等冶金过程实现固态连接的。对异种金属的适应性主要取决于每种方法的工艺特点。超声波焊接以超声波为能源，焊接所需的变形量很小，适用于物理性能（如导热、导电和硬度）差别大和厚度相差大的异种金属焊接。它常用于丝、箔和片等微小零件的精密焊接。对接电阻焊以被焊金属连接处的电阻为热源；根据其工艺特点又可分为电阻对焊和闪光对焊。电阻对焊易产生氧化物夹杂和未熔合，不适用于异种金属焊接。闪光对焊时通过闪光阶段在被焊金属的接触表面形成一薄层液态金属，在最后的顶锻过程中将液态金属连同氧化物夹杂和焊接时可能出现的一些金属间化合物一起挤出接口；并通过高温塑性变形形成质量较好的固态连接。因此，它能用于异种金属焊接，如高速钢和中碳钢刀具的对焊和铝 - 铜接头。但在焊接导电、导热性很好或导热、导电性差别大的异种金属时难度较大，需采取特殊工艺措施。摩擦焊是靠摩擦清除焊件表面氧化膜，并将机械能转换为热能加热焊件；与闪光焊不同，焊接过程中没有金属熔化，在顶锻力的作用下发生塑性变形、扩散和再结晶。其焊接质量优于闪光对焊，能用于冶金相容性差的异种金属焊接，如铝 - 钢、铝 - 铜、钛 - 铜和锆 - 钢等的焊接。爆炸焊是利用炸药爆炸的能量，在两被焊金属的高速撞击下，导致焊接界面上形成一薄层塑性变形以及少量熔化和扩散。在瞬间内（若干微秒）形成了爆炸焊特有的，很窄的（0.01 ~ 1 mm）的波形结合区。它对异种金属焊接的适应性强，能用于冶金相容性差的异种金属焊接。如钛 - 钢、铜 - 钢、铝 - 钢和铝 - 铜等的焊接。它特别适用于大面积复合，常用于双金属材料的制造，如复合钢板和复合管材。但它仅适用于简单接头的焊接。

由于各种焊接方法都有一定的适应性和局限性，因此生产中常采用联合工艺。例如熔化焊具有方便、灵活、适合于装配焊接和现场焊接，不受工件尺寸、结构型式和焊接位置等限制的特点；但它不适用于冶金相容性差的异种金属焊接。因此，经常先用其他方法将难焊的异种金属焊接成过渡接头，然后再用熔化焊在两端进行同种金属的焊接。如在电力工业和制冷设备中，常采用摩擦焊制造铝 - 铜过渡接头，然后在安装过程中用熔化焊在过渡接头的两端分别进行铝和铜的同种金属焊接。

2　异种钢焊接

2.1　异种钢焊接的应用及其分类

生产中异种钢焊接的应用范围很广，涉及的钢种很多。不同钢种组合的焊接性问题也不同。其组合主要取决于产品结构不同部位工作条件对材料性能的不同要求。根据使用要求大致可归纳为三种基本类型。

1）正常温度下的受力结构　如一些机械设备和工程结构。根据其不同部位的受力情况，采用不同强度级别的强度用钢。其中包括热轧、正火钢和低、中碳调质钢等，但它们都属于珠光体类型的钢。因此，它们之间的异种钢焊接，实际上就是不同强度级别的珠光体钢焊接。

2）各部位在不同温度下工作的设备　如在电站设备和化工设备中经常会遇到常温用钢和高温用钢（或低温用钢）

的焊接。常温用钢为前面列举的各种强度用钢。高温用钢为低、中合金的珠光体耐热钢以及高合金马氏体、铁素体和奥氏体耐热钢。低温用钢包括珠光体类型的细晶粒低合金正火钢和含镍高的低碳调质钢等低温钢（233～77 K）以及铬镍奥氏体超低温钢（低于77 K）。因此，用于这类设备的异种钢焊接可归纳为两大类：同一类型组织的不同钢种焊接，如珠光体强度用钢和珠光体耐热钢的焊接，以及不同类型组织钢种的焊接，如珠光体耐热钢和奥氏体耐热钢的焊接。

3）各部位在不同介质中工作的设备　如在化工设备中，没有腐蚀介质接触的部位，根据使用温度要求可采用常温的强度用钢或高温用的珠光体耐热钢；在腐蚀介质中工作的部位，根据不同的腐蚀要求可采用马氏体、铁素体、奥氏体或铁素体－奥氏体双相不锈钢。此外，在化工容器中还常采用不锈钢和碳钢的复合板以及不锈钢堆焊来制造异种钢结构。这类设备中的异种钢焊接主要是珠光体强度用钢或耐热钢与各种类型不锈钢的焊接。

因此，无论是何种情况下的异种钢焊接都可归纳为两大类：同类型组织的异种钢焊接和不同类型组织的异种钢焊接，即金相组织同属一类，但成分和性能有明显不同的异种钢焊接以及组织类型和成分、性能都不同的异种钢焊接。

2.2　同类型组织的异种钢焊接

这类异种钢焊接中包括了不同珠光体钢的焊接以及不同铁素体（马氏体）钢的焊接和不同奥氏体钢的焊接。后两类异种钢焊接很少遇到；而且每一类中的钢种也不多，成分也较接近。因此，它们的异种钢焊接问题并不特殊，与同种钢焊接基本类似。但不同珠光体钢的焊接用得很广；而且它们的种类很多，成分和性能相差也很大。在同类型组织的异种钢焊接中它的问题较多。

2.2.1　不同珠光体钢的焊接

（1）不同珠光体钢焊接的主要问题

珠光体钢的种类很多。其成分和性能相差很大，故其焊接性也不同。强度用钢中，随强度级别的提高，其含碳量、合金元素的含量和合金系统的复杂程度都在增加，从而导致其焊接性的变化。强度级别低的热轧钢的成分最简单，主要由C、Mn、Si三元素组成。其焊接性较好。强度级别较高的正火钢，在热轧钢基础上添加了一些形成碳化物、氮化物弥散质点的元素V、Nb、Ti和Mo等。而且还必须在正火状态下使用。因此，其焊接性较热轧钢差。其冷裂倾向和焊接热影响区的脆化倾向，随强度级别的提高而增加，焊接性相应变差。强度级别更高的调质钢中，又添加了一些能提高淬透性的合金元素，如Mn、Cr、Ni、Mo、V、Nb、B、Ti和Cu等。因此，在提高强度的同时，必然会增加冷裂倾向，使焊接性变坏，除热影响区脆化外又增加了软化问题。根据其含碳量，调质钢又分为低碳调质钢（C≤0.22%，质量分数）和中碳调质钢（C 0.25～0.45%，质量分数）二类。后者的淬透性更大，焊接性更差。此外，在特殊用途的珠光体钢中，耐热钢的含碳量较低，属低碳调质钢类型，故其焊接性类似于强度用钢中的低碳调质钢；珠光体低温用钢就是一些含Al、Ti、Nb的细晶粒正火钢，为提高低温韧性经常还含有一定量的Ni；随含Ni量的增加，在提高低温韧性的同时，钢的淬透性也在提高，故含Ni高的低温用钢（Ni5、Ni9）属低碳调质钢。因此，低温用钢的焊接性分别类似于强度用钢中的正火钢和低碳调质钢。因此，不论是那一类珠光体钢，对其焊接性来说都是取决于它的合金成分。按焊接性由好到差的排列次序为：热轧钢、正火钢、低碳调质钢和中碳调质钢。但从淬硬倾向出发，一些强度级别高的正火钢的焊接性比相同强度级别的低碳调质钢还差。

（2）不同珠光体钢焊接的工艺特点

1）焊接方法的选择　选择不同珠光体钢焊接的方法时，应根据其中对焊接热作用较敏感的母材，即焊接热对其热影响区性能和裂纹倾向影响较大者来确定。例如热轧钢与正火钢或调质钢一起焊接时，应根据正火钢或调质钢来选择。对正火钢和强度级别低于980 MPa的低碳调质钢来说大多数焊接方法都能采用，如手弧焊、埋弧自动焊、熔化极气体保护焊和钨极氩弧焊等。但对于强度级别高于686 MPa的低碳调质钢来说熔化极气体保护焊是最佳的自动化工艺方法。当低碳调质钢母材的强度级别超过980 MPa后，热影响区对焊接热很敏感。若焊后不能进行调质处理，则热影响区软化引起的接头强度下降将成为一个重要问题。故需采用热输入小的焊接方法，如钨极氩弧焊、电子束焊和激光焊等。这些方法同样适用于焊后不能调质处理的中碳调质钢的焊接。

2）焊接材料的选择　不同珠光体钢的焊接属于同类型钢的异种钢焊接。因此，其焊接材料的选择较为简单；主要是要求焊缝金属的性能不低于母材中，性能较低一侧钢材的性能。例如强度用钢和珠光体耐热钢一起焊接时，焊接材料的选择无需考虑耐热要求，主要是所得焊缝的常温力学性能要满足母材中强度较低一侧的要求。故可选用强度级别与强度较低母材相应的珠光体钢焊接材料。但若被焊的两种珠光体钢中有一种是淬硬倾向大，而且又不希望预热或焊后不能热处理时，如不希望预热的低温用调质钢或焊后无法再调质处理的中碳调质钢，可采用奥氏体类型的焊接材料。但此时需考虑奥氏体焊缝的热裂倾向及其屈服强度较低等问题。

3）焊接热输入的选择　焊接规范参数决定了焊接时的热输入。它直接影响到母材的熔化量（熔合比）以及冷却速度和热影区的宽度等因素，从而决定了焊缝成分、组织、性能以及母材热影响区裂纹倾向和脆化、软化等关键问题。因珠光体异种钢焊接属同类型钢种的焊接，因此热输入引起的熔合比变化对焊缝性能的影响并不严重，主要是冷却速度对热影响区冷裂倾向和脆化、软化等的影响较为严重。当异种钢焊接中有一侧是正火钢或低碳调质钢时，从防止冷裂纹出发要求冷却慢，但从避免热影响区脆化考虑要求冷却较快。因此，选择热输入时要保证冷却速度范围的上限不出现冷裂纹，其下限取决于热影响区不出现脆化组织，如粗大魏氏组织、上贝氏体和M－A组元等。通常在满足热影响区韧性的条件下，热输入应尽可能选择大一些。如果在允许的最大热输入条件下，仍有冷裂纹，则需采用预热。

4）预热及焊后热处理　不同珠光体钢焊接时，是否需要预热和预热温度多少，主要取决于异种钢中，含碳量和合金元素含量高的母材。此外，还必须考虑到其他因素对冷裂纹产生的影响以及预热对热影响区性能的影响。例如热轧钢和淬硬倾向较低的正火钢焊接时，一般不需预热；但在环境温度较低或大厚度和大刚度结构的条件下，需采取适当预热（110～150℃）。又如当两种被焊珠光体钢中，有一种是低碳调质钢或强度级别高的正火钢时，为防止预热对其热影响区韧性的不利影响，一般都采用低的预热温度（≤200℃）。

焊后热处理也与珠光体钢的种类及其使用要求有关。热轧钢和正火钢焊接时，一般不需焊后热处理；但要求抗应力腐蚀的容器和厚壁高压容器以及低温使用的容器都需要焊后消除应力的高温回火处理，一般在600～650℃。但当钢材有回火脆性时，如含钒钢，特别是含钒又含钼的低合金钢回火时要避开600℃左右的温度区。低碳调质钢一般不需焊后热处理，因为510～690℃消除应力处理对其热影响区韧性不利，有时还可能产生再热裂纹；如必须后热处理，则温度应比钢材的原来回火温度低50℃左右。

2.2.2　不同铁素体（马氏体）钢的焊接以及不同奥氏体钢的焊接

这三类异种钢焊接很少遇到；而且每一类中的钢种也不



多，成分也较接近。因此，它们的异种钢焊接问题并不特殊，与同种钢焊接基本类似。例如无论是马氏体耐热钢或是马氏体不锈钢，其基本成分都是含 Cr 量在 11% ~ 18% 范围内的 Fe-Cr-C 系合金，如最简单的 1Cr13、2Cr13。另外，为改善其高温性能和耐腐蚀性能常在钢中添加 Mo、V、W 和 Ni 等元素。但由于其都属高铬马氏体钢，因此焊接时的主要问题都是由于淬硬倾向大引起的接头的冷裂和脆化。不同马氏体钢的差别主要反映在其成分对冷裂倾向和脆化倾向的影响以及由此引起的对预热温度、层间温度和后热处理等的不同要求。如含 C 量在 0.10%以下时，预热温度为 150 ~ 200℃，层间温度 ≥150℃；当含 C 量在 0.20% ~ 0.50%时，预热温度为 300 ~ 400℃，层间温度 ≥300℃。另外，当采用马氏体钢填充材料时，为防止冷裂和改善接头韧性应采用适当的焊后热处理。当冷裂倾向大时，应焊后立即进行亚临界退火处理（650 ~ 780℃）。如无法预热或焊后热处理时，可采用奥氏体钢作填充金属；但其焊缝强度低于母材。当两种不同的马氏体钢一起焊接时，其焊接工艺应根据淬硬倾向大的母材来确定。

与高铬马氏体钢类似，各种高铬铁素体钢也都是 Fe-Cr-C系合金。为获得稳定的铁素体组织需提高含铬量或降低含碳量。其含 Cr 量一般为 17% ~ 28%，如 1Cr17、1Cr28；但当含碳量小于 0.03%时，含 Cr 量可降到 12%，如 00Cr12。另外，也可添加一些稳定铁素体的合金元素 Al、Nb、Mo 和 Ti 等，如 0Cr13Al、1Cr17Mo、1Cr17Ti。这类钢焊接时的主要问题是热影响区晶粒急剧长大引起的脆化，甚至裂纹。其脆化倾向和裂纹倾向与钢的成分有关，含铬量和间隙元素 C、N 的含量越高，则脆化和裂纹倾向越大。在采用相应的铬钢填充金属时，为防止裂纹产生可采用低温预热，一般希望 ≤150℃。但含铬、含碳量越高所需的预热温度越高，有时可高达 200 ~ 300℃。层间温度应保持在不低于最低的预热温度。焊后热处理温度一般为 750 ~ 800℃。在用奥氏体钢填充金属时或在焊接超纯高铬铁素体钢时不需预热和后热处理。另外，为防止热影响区过热，应采取小的热输入和窄焊道进行焊接，并控制层间温度不要过高。异种铁素体钢焊接时，应根据其中脆化和裂纹倾向大的母材来确定焊接工艺。

与前两类钢材相比，奥氏体钢的焊接要容易很多。各种奥氏体钢焊接时的一个共同问题就是焊缝热裂纹。其热裂倾向与奥氏体钢焊缝金属的成分有关，主要取决于 Ni、Cr 含量以及由此决定的凝固模式和凝固组织特点。凡形成单相奥氏体组织焊缝时，其热裂倾向就大；凡在焊缝凝固过程中有少量第二相析出时，其焊缝的抗热裂性能就好。从不锈钢的耐腐蚀性能出发，第二相应该是少量的 δ 铁素体（一般控制在 4% ~ 12%）。但对于需要长期高温工作的奥氏体耐热钢来说第二相应该是一次碳化物（C_1）或硼化物（B_1）。当某些特殊情况下要求焊缝为纯奥氏体组织时，可采用含 Mn 量高达 6% ~ 8% 的填充金属。因此，异种奥氏体钢焊接时的主要任务是根据其接头的工作条件和使用要求来确定焊接时所用的奥氏体钢填充金属。

2.3 不同类型组织的异种钢焊接

不同类型组织的异种钢焊接包括珠光体钢、奥氏体钢、铁素体钢和马氏体钢之间的不同组合。其中用得最广的是珠光体钢与奥氏体钢的异种钢焊接。这两类钢不仅成分相差很大而且物理化学性能相差也很大。因此，在这类异种钢焊接接头中存在成分、组织有明显变化的过渡区，特别是在结合界面处，往往成为缺欠产生的部位，但奥氏体钢与铁素体钢和马氏体钢之间的异种钢焊接，虽然两被焊钢材的组织有明显差别，但成分比较接近，除奥氏体钢还含有大量镍外，都是含铬量高的钢材。因此，这几类高合金钢组合在一起时的异种钢焊接较为简单。例如铬镍奥氏体钢与高铬铁素体钢或马氏体钢一起焊接时，铁素体钢和马氏体钢的焊接性较差。铁素体钢焊接时主要是由于晶粒严重粗化导致的接头脆化和裂纹，而马氏体钢主要是由于淬硬倾向大导致的接头脆化和裂纹。因此，这两类钢与奥氏体钢一起焊接时只要采用奥氏体钢焊接材料以及小热输入和不预热、不热处理即可。

2.3.1 珠光体钢与奥氏体钢的焊接

（1）珠光体钢与奥氏体钢焊接的主要问题

1）不均匀混合区（或称过渡区）内的马氏体脆化层　当用奥氏体钢作填充金属焊接珠光体钢与奥氏体钢时，在靠近珠光体钢一侧的奥氏体焊缝内由于熔化母材与填充金属的混合不充分而形成了一个成分变化的过渡区，即不均匀混合区。离熔合区越近，母材的稀释率越高，铬、镍等合金元素的含量越低。当含镍量低于 5% ~ 6%后，会出现高硬度的马氏体脆化层，位于紧靠珠光体钢一侧的焊缝边缘。提高奥氏体钢焊接材料中的含镍量能有效地减小马氏体脆性层的厚度。当采用镍基填充金属时，脆化层可完全消除。

2）扩散区中的脱碳层和增碳层　在珠光体钢母材与奥氏体钢焊缝的熔合线两侧，由于化学成分和组织状态的差异，在化学位梯度的推动下，导致了碳的上坡扩散。在焊缝边界的两侧形成脱碳层和增碳层。珠光体钢母材中的脱碳层为粗大铁素体软化层，而奥氏体焊缝中的增碳层为碳化物硬化层。这种现象在焊态下的单层焊接头中很不明显，在多层焊和焊后热处理或长期高温工作的接头中较为明显。它对接头的高温工作性能，如热疲劳、高温持久强度和抗蠕变性能等特别不利。从减小焊缝界面两侧碳的活度差出发，提高奥氏体焊缝中非碳化物形成元素，如 Ni、Si 的含量或提高珠光体钢母材中的强碳化物形成元素，如 Cr、Mo、W、V、Nb 的含量都有利于防止碳的扩散迁移。生产中除可采用镍基合金的填充材料外，常采用在珠光体钢母材的坡口上预堆一层含有强碳化物形成元素的珠光体钢、或镍基合金的隔离层。如 18-8 奥氏体钢与 $2\frac{1}{4}$Cr-1Mo 珠光体耐热钢焊接时，可先在珠光体钢的坡口上堆一层厚约 6 mm 的含铌的 $2\frac{1}{4}$Cr-1MoNb 隔离层，然后用高镍奥氏体钢（25-13）填充材料与 18-8 奥氏体钢一起焊接；或在珠光体钢上预堆一层镍基合金隔离层后，用 18-8 型奥氏体钢填充材料进行焊接。

3）焊接接头中的残余应力　由于接头中奥氏体焊缝与珠光体钢母材的热膨胀系数相差很大，在其界面附近将形成无法通过焊后热处理消除的焊接残余应力的高应力区。这对温度有循环变化的高温下工作的接头极为不利。在高应力和蠕变的作用下将导致珠光体钢母材热影响区脱碳层的早期断裂。为避免这种情况，可采用膨胀系数与珠光体钢接近的镍基合金作填充材料，使接头中的残余应力转移到塑性好的镍基合金焊缝与奥氏体钢母材的界面附近。

（2）珠光体钢与奥氏体钢焊接的工艺特点

1）焊接方法的选择　为尽量减小熔合比，防止珠光体钢母材稀释对焊缝成分、组织和性能的不利影响，如增加焊缝过渡区内的高硬度马氏体层的厚度和导致裂纹产生，应选择能获得最小熔合比的焊接方法和工艺。钨极氩弧焊和带极埋弧焊的熔合比最小，最低能达 10%；其次是手工电弧焊和熔化极气体保护焊，其熔合比在 20% ~ 30%；埋弧焊的熔合比最大。此外，在同一种焊接方法时，坡口角度对熔合比也有很大影响。

2）焊接材料的选择　选择焊接珠光体钢与奥氏体钢的焊接材料时，首先应避免焊缝内出现硬脆的马氏体和裂纹等缺欠。当采用 18-8 型不锈钢焊接材料（如 E308L-16）时，虽然焊缝主要为 18-8 型奥氏体钢，但难免有马氏体产生，故焊缝组织为 A+M。只有采用含镍高的 25-20 型奥氏体钢焊接材料（如 E310-16）时，焊缝才能获得单相的奥氏体组



织，但其热裂倾向较大。为提高焊缝抗热裂性能，应使焊缝成为含有少量铁素体的双相组织（A+F）。因此，应采用含镍量少低的25-13型奥氏体钢填充材料（如E309-15）。此外，当焊接接头须要在高温长期使用以及在温度周期性变化的条件下工作时，应选用镍基合金的焊接材料，如ENiCrFe-2或ENiCrFe-3焊条。

3）焊接工艺要点　为使母材的熔合比控制在最小，应采取加大坡口角度和小的热输入。由于采用高镍奥氏体钢或镍基合金的焊接材料，因此一般都不需预热和焊后热处理。如珠光体钢的冷裂倾向大，必须预热时，则预热温度应低于其同种钢焊接。这有利于减轻珠光体钢热影响区的软化。

2.3.2　珠光体钢与铁素体钢的焊接

这两种钢材焊接时都有脆化和裂纹问题。但其原因不同，珠光体钢主要是由于淬硬倾向大造成，而铁素体钢主要是与过热敏感引起的晶粒严重粗化有关。铁素体钢的这种粗晶脆化与一般的淬硬脆化不同，它是无法通过预热和焊后热处理来避免和消除的。铁素体钢的粗大晶粒只能通过冷作变形后的再结晶处理来细化晶粒和恢复韧性的。这在焊接结构中是无法采用的。因此，在有铁素体钢的异种钢焊接时，必须采取防止晶粒严重长大的工艺措施，如严格限制热输入和层间温度以及采用手工电弧焊和钨极氩弧焊等。

用于珠光体钢与铁素体钢焊接的填充金属有四种材料可供选择，即珠光体钢、铁素体钢以及奥氏体钢或镍基合金等。无论采用何种焊接材料都必须保证在不出裂纹的前提下，接头的使用性能不低于合金元素低的一侧母材的要求。当采用低碳钢或低合金钢和高铬体素体钢焊接材料时，焊缝中都不可避免地会产生马氏体组织，因此必须采取预热和后热。只有采用奥氏体钢或镍基合金焊接材时，才能免除预热和后热处理。例如采用铁素体钢焊条G307焊接低碳钢（Q235）与高铬铁素体钢（1Cr17）时，需进行200～300℃预热和焊后立即进行650～680℃回火。若采用奥氏体钢焊条（A307），则可取消预热和焊后热处理。在焊接一些淬硬倾向较大的珠光体耐热钢（如15CrMo）与高铬铁素体耐热钢（如1Cr17）时常采用奥氏体钢焊条（A307）。但由于碳迁移和热疲劳，使其不能用于高温长期工作和在温度有交变的条件下工作。因此，从接头的高温使用性能出发，最好选用与15CrMo钢相应的铬钼耐热钢焊条（R307），但需采取250～300℃预热和680～720℃回火。

2.3.3　珠光体钢与马氏体钢的焊接

这两类钢一起焊接时的特点主要取决于马氏体钢的焊接性。虽然珠光体钢焊接时也有淬硬脆化和冷裂纹，但高铬马氏体钢中除超低碳复相马氏体不锈钢外，其淬硬倾向都较严重，特别是一些以Cr12为基进行多元合金化的高铬热强马氏体钢（如1Cr12WMoV）的淬硬倾向更大。此外，马氏体钢也有较大的晶粒粗化倾向。随含碳量和合金元素的增加，马氏体钢形成粗大马氏体的倾向以及由此引起的脆化和冷裂倾向也增加。而且多数马氏体钢（如1Cr13和Cr12WMoV等类似钢种），在冷速较小时除马氏体外，还会出现粗大的铁素体，使塑性和韧性明显下降。因此，当异种钢焊接中遇到这类钢材时，应采用小的热输入。

在珠光体钢与马氏体钢焊接时，为防止冷裂纹的产生也可采用奥氏体钢焊接材料，如A307焊条。但此时也存在奥氏体焊缝与母材强度和膨胀系数不匹配等问题，甚至造成使用过程中接头过早破坏。因此，从保证接头使用性能出发，最好采用与母材同类型的焊接材料。如Cr13型高铬马氏体钢与铬钼珠光体耐热钢，如15CrMo一起焊接时可采用R307焊条。此时，需采取200～300℃预热和焊后立即进行680～700℃回火。当珠光体钢与多元合金的高铬热强马氏体钢焊接时，可采用与其成分相应的焊条，如R817、R827。此时，所得焊缝成分接近母材，组织为微细马氏体。焊接预热温度为300～400℃，焊后冷却到一定温度，经保温后（100～150℃保温0.5～1 h），立即升温到720～750℃回火。保温是为了使奥氏体完全转变。不能冷到室温后再进行回火是为了避免产生冷裂纹。

2.3.4　复合钢板的焊接

目前应用较广的复合钢板是由较薄的不锈钢复层与较厚的珠光体钢基层轧制而成的双金属板。常用的不锈钢复合层有Cr18Ni9Ti、Cr18Ni12Ti、Cr17Ni13Mo2Ti和0Cr12等，其厚度一般为总厚度的10%～20%。珠光体钢基层多为低碳钢（Q235）或低合金强度用钢（Q345）。复合钢板的焊接实际上包括了基层焊接、复层焊接以及基层与复层交界处的焊接。其中前两部分的焊接均属同种钢焊接，因此它们可以分别采用珠光体钢的焊接工艺和不锈钢的焊接工艺。基层和复层交界处的焊接则为异种钢焊接，因此这一部分的焊接应遵循奥氏体（或铁素体）不锈钢与珠光体钢的焊接工艺要求。选择焊接材料时应考虑到两种母材对焊缝稀释引起的硬脆马氏体组织。因此，必须采用含铬、镍高的25-13型奥氏体钢焊接材料，如A302、A307焊条。当复层为含钼奥氏体不锈钢时，应选用相应的含钼焊条A312。

为避免不同焊缝金属交界处可能出现的硬脆马氏体组织，对复合钢板的焊接顺序（见图4.12-4）有严格要求。应该先用相应的珠光体钢焊条焊接基层（见图4.12-4b），如基层为低碳钢Q235，则应采用相应的J422或J427焊条进行焊接；而且在焊接基层的第一道焊缝时必须防止奥氏体钢复层的熔化，以免进入焊缝后导致产生硬脆马氏体组织。焊完基层后，先清根（见图4.12-4c），然后再用高铬镍奥氏体钢焊条（如A302、A307或A312）焊接交界处的过渡层焊缝（见图4.12-4d）。这时必须遵照异种钢焊接工艺特点的要求，为减少基层和基层根部焊缝熔化后对过渡层焊缝的稀释作用，应采用小的热输入。最后在过渡层焊缝上用不锈钢焊条焊接复层（见图4.12-4e）。当复层材料为0Cr13或1Cr18Ni9Ti时可分别采用A102、A107或A132、A137；若复层为含钼的Cr18Ni12Mo2Ti，则应采用A212焊条。

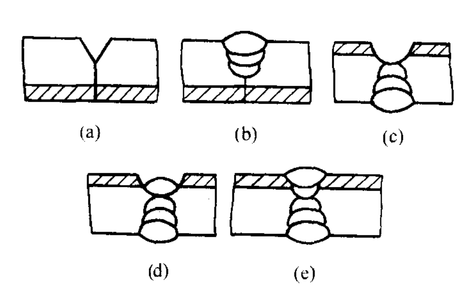


图4.12-4　复合钢板焊接顺序

3　钢与有色金属焊接

3.1　钢与铜及其合金的焊接

3.1.1　钢与铜及其合金焊接的主要问题

Fe与Cu在室温下的互溶度很小，但并不形成金属间化合物。因此，二者焊接在一起时的焊缝组织为双相固溶体（$\alpha+\varepsilon$），无脆化问题。但Fe-Cu合金的凝固温度区间很大，故其焊缝的热裂倾向较大。这与焊缝金属的成分和杂质含量有关。当焊缝含Fe量较低（0.2%～1.1%）时，焊缝类似纯Cu，呈粗大单相组织，抗热裂性能较低；随含Fe量增加，焊缝成为双相组织，抗裂性提高。当含Fe量为10%～43%时抗裂性最佳。此外，在钢与铜及其合金焊接



时，有一种特殊的渗透裂纹。它产生于钢的近缝区内，是由于液态铜及其合金对钢的渗透和拉应力共同作用的结果。产生渗透裂纹的倾向与铜合金的成分有关。Ni、Al、Si 元素能减少铜合金对钢的渗透。当铜合金焊缝中的含镍量高于 16% 时，在低碳钢中不会引起渗透裂纹。相反，锡能增加铜合金对钢的渗透深度。此外，不同组织的钢材对渗透裂纹的倾向也不同。液态铜能润湿奥氏体，但不润湿铁素体；因此单相奥氏体钢最易产生渗透裂纹。

3.1.2 钢与铜及其合金焊接的工艺特点

根据钢与铜的冶金相容性，几乎所有熔化焊方法以及固态压焊和钎焊都能用于它们的焊接。其中熔化焊用得最广。熔化焊所用的填充金属可归纳为两大类。第一类填充金属是纯铜及其合金。此时，为避免焊缝热裂纹的产生，必须严格控制钢的熔合比，将焊缝中的 Fe 含量保持在 10% ~ 43% 的范围内。在碳钢与纯铜焊接时可采用纯铜或硅青铜（QSi3 - 1）和铝青铜（QA19 - 2）作填充材料。后两种铜合金填充材料具有脱氧作用，并能减轻钢的近缝区渗透裂纹倾向。碳钢或不锈钢与硅青铜或铝青铜焊接时可采用铝青铜作填充材料。第二类填充金属是纯镍和含铜的镍基合金。由于 Ni 能与 Cu 形成连续固溶体，同时与 Fe 的冶金相容性也较好，而且还能防止钢的近缝区渗透裂纹。这类填充材料除直接用于焊接外，也可用于焊件表面隔离层的堆焊。例如先在铜的表面用镍填充金属堆焊高镍隔离层，然后用镍基合金填充材料与碳钢或不锈钢焊接。又如，在铜镍合金（白铜）与钢焊接时，为限制铁对焊缝金属的稀释以及由此引起的热裂纹，需在钢的坡口表面先用 Ni 或 Ni - Cu 填充金属堆焊高 Ni 隔离层后，用铜镍或镍铜填充材料与铜镍合金进行焊接。

钢与铜或热导率较高的铜合金焊接时为改善熔合，可对铜及其合金进行预热，预热温度取决于其厚度和成分。焊接时的电弧应偏向铜侧。为防止钢的近缝区渗透裂纹，应尽可能减少热输入和降低预热温度。对一些热导率低的铜合金，如铝青铜和铜镍合金不需预热；但与易淬火钢材一起焊接时，预热温度和层间温度都取决于钢的淬硬倾向。

3.2 钢与镍及其合金的焊接

3.2.1 钢与镍及其合金焊接的主要问题

Fe 与 Ni 的物理、化学性能很接近，能无限固溶，一起焊接时所得焊缝为固溶体组织。因此，经常将镍基合金作为异种钢焊接以及易淬火钢焊接时的填充金属。根据其冶金相容性，钢与镍及其合金焊接时的焊接性应该很好；但钢和镍合金中的合金元素与杂质元素有可能导致熔化焊时的冶金缺陷，如常见的气孔和裂纹。与纯镍和镍基合金焊接时的情况类似，钢与镍及其合金焊接时的气孔是冷却过程中 NiO 与液体金属中的氧和碳反应生成的水蒸气和 CO 气孔。这时的碳主要来自钢，因此气孔的倾向随钢的熔合比增加及其含碳量的增加而增加。而且熔池中氧的溶入量随含镍量提高而增加；故焊缝的气孔倾向随含镍量的提高而增加。但当含镍量提高到一定程度（60% ~ 90%）后，由于含碳量降低很多，而使气孔倾向又重新下降。此外，在焊接合金钢与镍及其合金时，焊缝中的其他合金元素也会影响到它的气孔倾向。凡有脱氧作用的元素（如 Mn、Ti、Al）和能提高气体在固态金属中溶解度的元素（如 Mn、Cr）都能降低焊缝的气孔倾向。因此，镍与不锈钢焊接时的气孔倾向小于镍与碳钢的焊接。钢与镍基合金焊接时的热裂纹问题与镍基合金的类型有关。对于固溶强化的镍基合金，主要是焊缝结晶裂纹；对于沉淀强化型镍基合金除焊缝结晶裂纹外，还可能出现近缝区的液化裂纹。高镍焊缝结晶裂纹倾向大，是由于其单相的粗大柱状晶组织和晶界的低熔点共晶体（Ni - S、Ni - P）。由于钢中的 S、P 含量高于镍和镍基合金，因此在镍及其合金与钢焊接时要控制由于钢对焊缝稀释引起的焊缝中 S、P 含量的提高。此外，降低焊缝中的含氧量能减少 Ni - NiO 共晶而对降低裂纹倾向有利。故提高锰含量无论对减少硫的有害作用或脱氧都有利于减小裂纹倾向。除硫、磷、氧等杂质外，镍基合金的成分对焊缝的热裂倾向也有很大影响。固溶强化型镍基合金的热裂倾向小于沉淀强化型镍基合金；而且固溶强化型合金中较高的 Mo、W 含量有利于减小热裂倾向。因此，固溶强化型的 Ni - Cr - Mo 系焊丝（如 HGH3113）具有优良的抗结晶裂纹性能。沉淀强化型镍基高温合金的热裂倾向随 Al + Ti 含量的增加而增大；当（Al + Ti）的含量达到 6% 后，热裂敏感性显著增加，甚至使其无法采用熔化焊。另外，在含镍高的合金中，Si 能形成低熔共晶，而使其热裂倾向增大。因此，一般将焊缝中的含 Si 量限制在不超过 0.75%。加 Nb 可抑制 Si 的有害作用，故在焊接含 Si 量高的铸造镍基合金时，常用含 Nb 填充金属。另外，当镍基高温合金中的 C、B 含量增加时其裂纹敏感性也增大。

3.2.2 钢与镍及其合金焊接的工艺特点

焊接方法的选择与被焊镍基合金的类型有关。固溶强化型镍基合金对焊接方法的适应性较好。凡用于铬镍奥氏体钢焊接的各种方法都能用于这类镍基合金与钢的焊接。但焊接一些沉淀强化的镍基合金时，由于其含有较多易氧化的合金元素以及容易产生裂纹，故不宜采用保护效果差和热输入大的焊接方法，如手弧焊、埋弧焊和熔化极气体保护焊等。当焊接一些裂纹倾向大、焊接性差的高温镍基合金时需采用固态压力焊或钎焊。

在焊接钢与镍和镍基合金时，普遍采用镍和镍基合金的填充金属。其选择取决于被焊镍基合金和钢的种类。例如在手弧焊纯镍和各种钢时，可采用 ENi - 1 或 ENiCrFe - 2 焊条。在焊接因康镍 600 合金（相当于 NS316）与各种钢时可采用相应合金系统的 ENiCrFe - 2 焊条；而焊接哈斯特洛伊 C - 276 合金（相当于 NS111）与各种钢时可采用相应的 ENiCrMo - 4 焊条。但在镍铜焊缝中铬的最大容许量为 8%，因此镍铜合金焊条 ENiCu - 7 只能用于焊接镍铜合金蒙乃尔 400 与碳钢和低合金钢，而不能用于镍铜合金与不锈钢的焊接。蒙乃尔 400 与不锈钢的焊接可采用ENiCrFe - 2 焊条。此外，在焊接一些沉淀强化型镍基合金和含镍高的铁镍基合金时，为减小焊接时的热裂倾向可采用固溶强化型填充金属，如沉淀强化型镍铜合金蒙乃尔 K - 500 与碳钢和低合金钢焊接时可采用 ENi - 1 焊条，与不锈钢焊接时可采用 ENiCrFe - 3 焊条。当沉淀强化型铁镍基高温合金 GH2132 与不锈钢 1Cr18Ni9Ti 焊接时可用抗裂性能优良的固溶强化型 Ni - Cr - Mo（W）系焊丝 HGH3113 或 HGH3044。

在焊接钢与镍和镍基合金时要严格控制热输入。高的热输入会引起焊缝和热影响区晶粒的粗大以及在过热区内出现液化和碳化物析出等不利的冶金过程，从而导致裂纹的产生以及影响到一些耐蚀镍基合金的接头耐腐蚀性能。减小热输入时一般倾向采用小电流和低的焊速；这样既能防止裂纹产生，又有利于改善熔合质量，常采用小截面焊道的多层焊，必要时可采用脉冲钨极氩弧焊和分段焊等工艺措施。

3.3 钢与铝及其合金的焊接

3.3.1 钢与铝及其合金焊接的主要问题

Fe 与 Al 的冶金相容性差，固态下的互溶度很小，但能形成一系列的硬脆金属间化合物。因此，从原则上讲，除冷压焊外，凡需加热到有熔化和扩散的焊接方法都会在钢与铝及其合金的接头中引起金属间化合物的产生，使接头脆化。此外，即使在焊态下没有金属间化合物的冷压焊接头，在随后的加热过程中通过界面处的互扩散还会产生金属间化合物，使接头变脆。例如 1Cr18Ni9Ti 与 LF6 的冷焊接头强度可



达 300 MPa 左右；但经 350℃加热 1～2 h 后，强度降得很低，有时甚至开裂。故冷压焊接头不能加热和在加热条件下使用。此外，由于钢与铝及其合金的熔点和热导率相差很大而使它们在熔化焊时的加热和熔化很难均匀。而且，铝很易氧化，液态铝对钢的润湿不良，因此熔化焊时很难获得良好的熔合。另外，由于钢与铝的膨胀系数相差很大而使其焊接接头中形成高的内应力。

3.3.2　钢与铝及其合金焊接的工艺特点

无论是熔化焊或加热加压条件下焊接的钢与铝的接头中，出现金属间化合物几乎是不可避免的。从防止和减少接头中金属间化合物的生成出发，常用的工艺措施是采用中间层和表面涂层以及减小热输入和加速焊接过程等。因此，不能采用传统的熔化焊方法，需在钢的表面先涂覆一种金属涂层，并采用熔焊－钎焊工艺在钢不熔化和表面涂层不破坏的情况下，采用钨极氩弧焊将铝合金填充金属和被焊铝或铝合金熔化后流向钢表面涂层，与其形成结合。这种接头的强度取决于涂层与钢表面的结合强度，涂层金属的强度以及涂层厚度等。选择表面涂层金属的条件是，它必须与铝合金填充金属有良好的相容性，如铝、银、锡和锌等。铝是最常用的一种涂层，其制备方法是将钢在 690～740℃的熔化铝液中浸渍一层铝。也可在钢表面涂覆银钎料或镀锌。镀锌前先镀铜有助于改善镀层结合强度。在铝填充金属中加入硅、铜或锌 3%～5%有助于减小焊缝界面与镀锌层之间的金属间化合物的厚度。在这种熔化焊接头中涂层的作用是改善液态铝合金对钢的润湿以及防止它与钢的直接接触。但这种接头的最高工作温度一般为 260℃。过高温度下工作时会由于扩散而生成金属间化合物，使接头强度下降。

这种涂层技术在钢与铝及其合金的钎焊以及扩散焊和爆炸焊时同样适用。钢与铝及其合金用锡铅钎料进行软钎焊时可先在铝及铝合金上镀锌，再镀铜或镍。硬钎焊时由于铝钎剂不能去除钢表面的氧化膜，因此焊前要在钢表面镀锌、铝或镍；也可在保护气体中钎焊，但铝表面的氧化膜仍需用钎剂清除。在钢与铝及其合金的直接扩散焊时，由于金属间化合物的生成而得不到高强度的接头；常用加中间层或电镀层的办法来提高其接头强度。如铝锰合金与碳钢扩散焊时可加一层镍箔或在钢上先镀铜后再镀镍。采用这种中间层后可防止出现高硬度的脆性金属间化合物；但延长扩散焊时间将由于 Al_3Ni_2 相的宽度急剧增加而使接头强度大大降低。爆炸焊接头是在瞬时内形成的固态连接。因此，工艺参数选择合适时不会生成连续的金属间化合物层。为提高接头的强度也可采用中间层的办法。例如铝镁合金与不锈钢爆炸焊时可加纯铝和纯铜的复合中间层；纯铝紧贴铝镁合金，纯铜紧贴不锈钢。

摩擦焊具有能量输入低、无熔化以及热循环迅速等特点，因此有利于限制钢与铝及其合金焊接时的界面扩散和金属间化合物的生成。摩擦焊时缩短摩擦时间和加大顶锻压力都能减少金属间化合物和提高接头强度。例如摩擦焊铝与奥氏体不锈钢时，通过优化工艺参数可将脆性金属间化合物限制在一个窄小的范围内，避免了对接头性能的有害影响。在钢与铝及其合金的焊接时，从控制界面扩散，减少金属间化合物和提高接头强度出发，爆炸焊和摩擦焊以其特有的快速热循环、瞬间加压以及快速局部塑性变形等优点胜过了其他的焊接方法。因此，常采用这两种方法制造用于熔化焊时的过渡接头。

3.4　钢与钛及其合金的焊接

3.4.1　钢与钛及其合金焊接的主要问题

Fe 与 Ti 室温下的互溶度很小，易形成金属间化合物。因此，钛及其合金与钢熔化焊时会生成大量的金属间化合物使焊缝脆化，特别是与不锈钢焊接时钛能与铁、铬、镍形成更为复杂的金属间化合物，使焊缝的脆化更为严重。为限制和避免焊接接头中脆性金属间化合物的生成，钢与钛及其合金的焊接采用压焊和钎焊较为合理。此外，由于钛非常活泼，为避免焊钛时氧、氮、氢污染引起的接头脆化，凡温度高于 400℃的部位均需采取保护措施。因此，钢与钛及其合金焊接时必须在惰性气体保护下或在真空中进行。

3.4.2　钢与钛及其合金焊接的工艺特点

钢与钛及其合金直接焊接时很难获得满意的接头。为防止和尽量减少焊接接头中脆性金属间化合物的产生，确定焊接工艺时的主要任务是选择合适的过渡段或中间层材料以及相应的焊接方法。钢与钛及其合金的间接熔化焊时，可采用钛或钛合金与钢的爆炸焊接头作过渡段，然后在过渡段的两端用氩弧焊进行同质材料的焊接。当采用中间层材料时，应同时考虑它与钛和钢的冶金相容性。钛能与铌、钼、钽、钒和锆形成连续固溶体。但其中只有钒同时能与钛和铁相互固溶。因此，钒能作为中间层用于钛与钢的焊接。如钛与低碳钢和 18－8 型的不锈钢进行电阻点焊时，可采用钒作中间层，但要求不能将中间层钒熔透。在间接熔化焊时可采用轧制的钛合金－钒－铜－钢复合材料作为过渡段，使钛合金与钢的焊接转化为同种金属的焊接。为避免中间层熔透，应采用能量密度高、热输入小的焊接方法，如电子束焊。这种复合中间层实际上就是一个带有中间层的钛合金与钢的热压扩散焊过渡接头。

钛及其合金与钢直接扩散焊时，在其连接区内不可避免地会形成一定厚度的金属间化合物层，由于其厚度超过 1～2 μm 而使接头脆化。因此，直接扩散焊接头不能保证具有足够的强度和塑性。作为中间层材料只有钒同时能与钛和铁都不形成金属间化合物；但钢中的碳能向钒中激烈扩散，在钢与钒的界面处形成 VC 使接头性能下降。为防止钢中碳向钒扩散，需在钢与钒之间加铜的隔离层。铜与钒和铁都不形成金属间化合物，而且碳又不溶于铜。此时的扩散焊接头由钛（或钛合金）－钒－铜－钢组成；接头强度与铜和钒的厚度有关。在扩散焊 TA7 钛合金与 1Cr18Ni9Ti 时可采用复合中间层 V－Cu－Ni。其中 Ni 层可以改善钢界面处的塑性。这种复合中间层也可采用真空轧制成带。采用这种中间层可将钛合金与钢扩散焊接成各种过渡接头，如管状过渡接头，然后两端用氩弧焊分别与钛合金管和钢管进行熔化焊。

钢与钛及其合金的钎焊应在真空中或惰性气氛中进行。大多数常用钎料因能与钛发生反应生成金属间化合物而使其不能用于钛与钢的钎焊。例如常用的铜基钎料和含铜较高的银基钎料，因钛能与铜生成脆性的 Ti_2Cu 而不适用于钛。因此，用于钎焊钛的银铜钎料中的含铜量不应超过 10%。纯银可用作钎焊钛的钎料，因为银对钛的润湿性很好，而且形成的金属间化合物 TiAg 不太脆。银基钎料中银铝钎料（Ag－5Al）是一种适合于钛及其合金钎焊的钎料，因为铝和钛形成的金属间化合物也不太脆。用这种钎料在 900℃钎焊时，对钛无不良影响。如需在较低温度下进行钎焊，可选用铝基钎料。因此，钢与钛及其合金钎焊时，可根据钎焊温度的要求选择适合于钛及其合金的铝基钎料和含铝或含铜量低的银基钎料。

3.5　钢与难熔金属及其合金的焊接

3.5.1　钢与难熔金属及其合金焊接的主要问题

W、Mo、Ta、Nb 等高熔点金属与 Fe 在室温下的相互溶解度都很小，主要形成金属间化合物；而且它们与铁的熔点相差很大。因此，钢与难熔金属及其合金之间很难进行熔化焊。熔化焊时只能采用难熔金属不熔化的熔焊－钎焊工艺。如焊接奥氏体不锈钢与铌或铌合金时可采用真空电子束焊或



在充氩的保护室中用钨极氩弧焊将钢熔化后对固态的铌或铌合金进行润湿，形成接头。这种熔焊－钎焊工艺同样可用于钢与其他难熔金属及其合金的焊接。如奥氏体不锈钢与钼的焊接。另外，由于难熔金属很易受气体杂质污染而脆化，因此其焊接都在惰性气氛中或真空中进行。

3.5.2 钢与难熔金属及其合金焊接的工艺特点

钢与难熔金属及其合金的主要焊接方法是扩散焊和钎焊；此外，也有采用摩擦焊和爆炸焊，如钽与不锈钢的爆炸焊，铌与不锈钢的摩擦焊。但在钢与难熔金属直接扩散焊时，难免在接头中会形成一些金属间化合物。如 Mo 与 1Cr18Ni9Ti 直接扩散焊时接头中出现了一个厚度约 5 μm 的钼与铁和钼与镍的金属间化合物层。Nb 与 40Cr 钢扩散焊接头中形成一个厚度约 4 μm 的铌和铁的化合物层。为改善接头性能，除通过严格控制工艺参数尽可能减小金属间化合物层厚度外，有效的办法是采用加中间层（如 Ni、Cu）的扩散焊。

钢与难熔金属及其合金的钎焊应在真空或高纯氩中进行。为改善润湿性，常在难熔金属表面镀镍或铜。钎料应根据使用要求选择。如用 Cu－10Ni－10Mn－2.5Cr－1.5Fe－0.5Si 钎料钎焊 Mo 与 1Cr18Ni9Ti 时，接头 600℃ 的强度为 212－225MPa。为避免钎料中的合金元素与难熔金属形成金属间化合物，除尽量缩短保温时间和严格控制钎焊温度外，还可采用隔离层。如钎焊钼时可镀铬作隔离层。

4 异种有色金属焊接

4.1 铝与其他有色金属的焊接

4.1.1 铝与铜及其合金的焊接

（1）铝与铜及其合金焊接的主要问题

固态下铜在铝中的溶解度很小，能形成一系列金属间化合物。Al－Cu 合金中 Cu 含量在 12%～13% 以下时性能较好，当含有大量金属间化合物时就会很脆。因此，铝与铜的熔化焊时应将其焊缝的含铜量控制在该范围以下，但一般熔化焊很难达到。另外，铝与铜焊接时应从铝的要求出发采取严格的保护措施和去除 Al_2O_3 膜的措施。

（2）铝与铜及其合金焊接的工艺特点

熔化焊铝与铜时常采用压焊制备的铝－铜接头做过渡段进行间接焊。此外，也可采用熔焊－钎焊工艺，如在用铝或铝硅填充金属焊接铝与铜时，可在铜表面预涂银或银合金层，并在焊接时保持涂层不被熔透。另外，也可采用锡、铝和锌作为铜表面的涂层。

从避免界面金属间化合物出发，冷压焊是一种较理想的连接铝和铜的方法。所有加热加压的焊接方法，如真空扩散焊、闪光对接焊、摩擦焊和爆炸焊等都会导致金属间化合物的形成。但接头中金属间化合物的厚度与所用压焊方法的工艺特点及其工艺参数的控制有关。如闪光对接焊与摩擦焊可以通过再后的顶锻过程，尽可能将金属间化合物挤出接口。例如无氧铜与纯铝摩擦焊时，接头中的金属间化合物层的厚度随顶锻力的增加而减小，接头拉伸强度相应增加。当顶锻压力大于 120 MPa 时，接头断于铝的热影响区；反之，当顶锻力低于 80 MPa 时，主要断在金属间化合物层，接头强度低。爆炸焊时由于接头在爆炸瞬间内形成，故有利于限制金属间化合物的形成。在电力系统中，常将这种爆炸焊铝－铜过渡接头用于铝和铜的间接熔化焊。在铝与铜的真空扩散焊时，为减少脆性金属间化合物的形成，应严格控制扩散焊温度和时间；也有采用在铜表面预制涂层的方法，如镀锌或涂覆银钎料。当焊接工艺参数控制合适时，真空扩散焊完全能满足连接一些不要求承载的铝－铜构件。如用于焊接一些主要要求真空密封性能的电真空元件。

铝与铜钎焊时的主要困难是铝表面极易生成高熔点的致密氧化膜。因此，铝与铜钎焊时，钎焊材料和钎焊工艺的选择都应满足钎焊铝的要求。铝与铜的软钎焊时常在铝的表面先镀锌再镀铜或镍，然后用锡铅钎料进行钎焊。在铝与铜的硬钎焊时，应采用焊铝的铝基钎料，但需严格控制钎焊时间，尽量缩短液态铝基钎料与铜的接触时间，以免生成金属间化合物层，影响接头性能。为防止金属间化合物的产生可在铜上镀一层银或高银合金。在钎焊时为避免采用焊铝的强腐蚀性钎剂，应在真空或高纯度的保护气氛中进行。

4.1.2 铝与钛及其合金的焊接

（1）铝与钛及其合金焊接的主要问题

固态下钛在铝中的溶解度很小，能形成金属间化合物。因此，焊接时，特别是熔化焊时非常容易形成大量的金属间化合物而使接头脆化，甚至产生裂纹。此外，它们在热物理性能和力学性能方面的很大差异给焊接工艺也造成了很大困难。例如，铝与钛在导热和导电方面的很大差异严重地影响到电阻焊时热量在接头中的均匀分布。

（2）铝与钛及其合金焊接的工艺特点

由于铝与钛的熔点相差达 1 000℃ 以上以及熔合在一起时会生成大量的金属间化合物，因此传统的熔化焊方法不适用于铝与钛及其合金的焊接；应采用熔焊－钎焊工艺，利用钨极氩弧焊将铝熔化后与钛形成钎接。为控制铝－钛界面金属间化合物层的厚度，应严格保持熔池温度不超过 850℃。为改善界面结合，可在钛的表面预先进行渗铝处理。此外，也可采用适合于铝及铝合金用的铝基钎料，在真空条件下对铝与钛及其合金进行快速钎焊。

从尽量避免和减少铝－钛接头中金属间化合物的形成出发，冷压焊、爆炸焊、摩擦焊和真空扩散焊等压力焊都能获得性能较好的接头。其中冷压焊的接头性能最好。真空扩散焊时除应严格控制焊接温度和时间外，可采用加中间层的办法。如在铝的表面预镀一层银，能起到防止焊接过程中铝表面的氧化以及避免界面脆性金属间化合物层的产生等作用。

4.1.3 铝与镍及其合金的焊接

铝与镍焊接时的冶金相容性很差，能形成一系列的金属间化合物，故不能采用直接熔化焊，而压力焊和钎焊较为合适。除冷压焊外，凡是需要加热和有扩散过程的焊接方法（包括压力焊和钎焊）都可能在接头中导致金属间化合物的产生。因此，必须严格控制焊接工艺参数（温度和时间）或采用中间层。例如铝与镍扩散焊时，当焊接温度和焊接时间超过一定范围后，由于 Al_3Ni 和 Al_3Ni_2 等金属间化合物的生长而使接头强度不断下降。镍、镍基金及蒙乃尔合金与铝钎焊时常需在镍及其合金的表面先在熔化铝中浸渍铝，然后用铝基钎料进行钎焊。为减少接头中脆性金属间化合物的生成，需尽量缩短钎焊时间。

4.2 铜与其他有色金属的焊接

4.2.1 铜与镍及其合金的焊接

（1）铜与镍及其合金焊接的主要问题

Cu 与 Ni 能相互无限固溶，不形成金属间化合物。因此，从冶金相容性出发，铜与镍及其合金的焊接类似于同种材料的焊接。但由于它们的导热、导电性能相差很大而影响到它们焊接时的热过程和接头的形成，这在电阻焊时更为突出。因此，需要采取一些相应的工艺措施来调整焊接时的热量分布。如调整热源位置，改变散热条件等措施。根据铜与镍及其合金的焊接性特点，它们在熔化焊时的主要问题是热裂纹和气孔。为防止这类缺陷，可在填充金属中加入 Ti、Mn、Nb 等合金元素以及控制焊接热输入等措施。

（2）铜与镍及其合金焊接的工艺特点

熔焊、压焊和钎焊都能用于铜与镍及其合金的焊接。熔



化焊中最佳的方法应属钨极和熔化极惰性气体保护焊以及等离子弧焊等。选择焊接材料时，可根据对接头性能的要求，从一般的Cu-Ni、Ni-Cu和纯Ni焊丝中选择。也可采用不加填充金属的钨极氩弧焊和等离子弧焊。铜与镍及其合金的扩散焊非常容易、不需采用中间层，所得接头为连续固溶体组织。

4.2.2　铜与钛及其合金的焊接

（1）铜与钛及其合金焊接的主要问题

固态下铜与钛的相互溶解度不大，能形成一系列金属间化合物。因此，铜与钛及其合金焊接时的主要困难是金属间化合物引起的接头脆化。采用中间层是防止焊接时铜与钛之间形成金属间化合物的有效措施。此外，为防止铜与钛焊接时钛被气体杂质污染引起的脆化，应采取焊钛的相应保护措施。

（2）铜与钛及其合金焊接的工艺特点

熔化焊铜与钛及其合金时，可采用加入能降低 $\alpha \rightarrow \beta$ 转变温度的合金元素Mo、Nb或Ta的专用单相 β 钛合金作为中间层。因为铜也属于 β 稳定元素，与 β 钛具有较好的相容性。如 β 钛合金Ti-Nb30和Ti-Al3-Mo6.5-Cr11与铜之间采用钨极氩弧焊可以获得强度和塑性良好的焊缝。另外，铜与钛及其合金焊接时也可采用以铌作中间层的钨极氩弧焊。

采用加中间层（如Nb）的扩散焊可以获得质量好的铜与钛及其合金的接头。不采用中间层时只有在很窄的焊接工艺参数（温度和时间）范围内才能获得质量较好的接头。如在制造真空器件的零件中钛合金与无氧铜扩散焊时，不采用中间层的接头强度明显低于母材的强度；虽然不能用于受力的结构件，但完全可以符合真空器件的使用要求。此外，爆炸焊和摩擦焊也能用于铜与钛及其合金的焊接。摩擦焊时顶锻过程中能否将金属间化合物挤出接口，对接头质量具有决定性的作用。如在钛与无氧铜的焊接接头中存在一个铜与钛的过渡层；其中包含有脆性的金属间化合物。当顶锻压力增大时该层的厚度减小，接头强度增加。当顶锻压力超过250 MPa时，接头破坏在无氧铜的热影响区内。但当顶锻压力低于200 MPa时，接头断于过渡层。当纯钛与烧结的Cu-W合金摩擦焊时由于顶锻时，界面处的塑性流动差，甚至顶锻压力超级250 MPa时，接头仍在过渡层破坏。

在铜与钛及其合金的钎焊时，钎焊温度必须适应其中熔点低的铜，钎料应同时能与铜和钛相容。常用于铜及其合金钎焊的铜基钎料和含铜量高的银基钎料，由于其中含有大量能与钛形成脆性金属间化合物的铜而不适用于钎焊钛及其合金。为避免钎焊接头中形成脆性的 Ti_2Cu，应将银基钎料中的含铜量限制在不超过10%（如Ag-7.5Cu）。银和铝虽然也能与钛形成金属间化合物，但它们并不太脆。因此，银铝钎料（如Ag-5Al、Ag-5Al-0.5Mn）以及铝基钎料（如Al-4.8Si-3.8Cu-0.2Fe-0.2Ni和Al-1.2Mn）都能用于钛及其合金的钎焊。为避免和尽量减少金属间化合物的生成，钎焊时应严格控制钎焊温度和保温时间，特别是在采用铝基钎料时应尽量缩短液态铝基钎料与铜的接触时间，以免接头脆化。另外，为防止钛受气体杂质的污染而脆化，钎焊应在高纯度的惰性气体中或真空中进行。

4.3　异种难熔金属的焊接

4.3.1　异种难熔金属焊接的主要问题

钨、钼、钽、铌的熔点都在2 000℃以上。它们能很好地相互固溶，因此它们的冶金相容性很好，应能熔焊在一起。但它们的焊接性还与其他的物理化学特性有关。这些金属焊接时的主要困难与其焊接时金属的脆化有关。其脆化的原因有两个方面：一方面是间隙杂质引起的脆化。主要是由于高温下金属与大气之间的剧烈反应导致的金属脆化。另一方面是由于它们无同素异构转变；当加热超过再结晶温度后，晶粒长大导致金属脆化。根据其焊接时脆化的严重程度以及对焊接的适应性，可将难熔金属分为两类：焊接性好的铌和钽以及焊接性差的钼和钨。

4.3.2　异种难熔金属焊接的工艺特点

铌与钽虽然很活泼，在加热过程中极易与氧、氮、氢等反应使金属脆化，但它们的脆性转变温度都低于室温。尤其是钽的脆性转变温度很低，无冷脆倾向，受间隙杂质含量的影响很小。铌和钽的焊接性类似于钛。当采用可靠的保护措施和小的热输入时，铌和钽可很好地熔焊在一起。常用的熔焊方法为在充氩或氦的控制气氛室内进行的电弧焊和真空电子束焊。另外，钽与铌熔化焊时也可采用铌熔化钽不熔化的真空电子束焊-钎焊工艺。但铌和钽与钼和钨熔化焊时，所得接头的室温塑性很差，易产生裂纹。这主要与钼和钨的焊接性差有关。钼和钨对间隙杂质的化学活性虽然低于铌和钽，但由于其溶解度很小，因此对这些杂质引起脆化的敏感性高于铌和钽。当间隙杂质的化合物（如氧化物、氢化物和碳化物等）分布在晶界上时，使晶界脆化。因此，这些金属的脆性转变温度随间隙杂质含量的增加而提高。其中以氧引起的脆化最为严重。因此，在熔化焊钼和钨时要求更有效的防氧措施，如真空电子束焊。钨对间隙杂质的敏感性比钼更高。钨的脆性转变温度高于室温；钼的脆性转变温度可从低于室温到远高于室温之间变化。此外，再结晶也是导致钼和钨脆性转变温度高的一个重要原因。再结晶后不仅晶粒粗大，而且使原来变形状态下分散分布的杂质以连续的薄膜形式分布于晶界，使再结晶后的脆性转变温度比塑性变形状态下的约高300℃。因此，焊接时的温度控制很重要。凡是在钼和钨再结晶温度（钼约为1150℃，钨约为1250℃）以下的焊接工艺和方法（如真空扩散焊和钎焊）都将有利于提高接头的性能。因此，异种难熔金属焊接中凡涉及钼和钨时，由于其熔点高，导热性能好以及对热作用和间隙杂质的敏感性高，真空电子束焊是其最适合的熔化焊方法。采用低热输入和高速焊接，特别是采用脉冲电子束焊将有利于控制焊缝和过热区的晶粒长大。此外，在熔化焊钼与钨时为改善焊缝塑性和防止裂纹产生，可以采用对间隙杂质敏感性低的含铼合金，如钨-铼和钼-铼合金做填充金属，使焊缝金属的脆性转变温度降低到低于室温。另外，为避免钼与钨焊接时裂纹的产生以及接头性能的改善，应进行接近或高于其脆性转变温度的预热（钼为200~500℃、钨为300~600℃）和伴随焊接过程的加热以及焊后迅速加热到母材再结晶温度以上进行消除应力处理。当异种难熔金属焊接中包含有钼或钨时，接头的性能将取决于钼和钨的焊接性，在制定焊接工艺时首先应满足焊接性差的金属钼和钨的要求。钽-钨、铌-钨熔化焊时可采用仅钽、铌熔化的真空电子束焊-钎焊工艺。

真空扩散焊较适合于异种难熔金属的焊接。降低扩散焊温度是防止难熔金属再结晶脆化的关键。采用中间层金属是激化扩散过程，降低焊接温度，提高接头性能的一种常用方法。例如钼-钨可在1 900℃进行直接扩散焊，但接头强度不高。为提高接头强度需采用中间层（如钽箔）。在扩散焊钨铼合金与钼时采用电镀铼中间层，接头质量良好。塑性好的铌能与钼在1 400℃进行直接扩散焊。此外，电阻点焊和缝焊也有用于对强度要求不高的异种难熔金属构件的连接。

钎焊是连接异种难熔金属的一种较理想的焊接方法。为防止钼和钨钎焊时晶粒长大以及氧化引起的脆化，钎焊应在真空中或惰性气体和还原性气体中进行；钎焊温度应根据使用要求，尽可能低于其再结晶温度。当高于再结晶温度时应尽量缩短钎焊时间。例如使用温度低于400℃时可以采用钎焊温较低的铜基或银基钎料在保护气氛中进钎焊。为改善钎



料对钨和钼的润湿可在其表面镀镍或铜。当要求低于 1 000℃的高温下使用时需采用钎焊温度较高的锰基和镍基钎料。如钼与钨一起钎焊时可采用 Mn－Ni－Co 和 Ni－Cr－Si－B 钎料在氩气保护下进行。钼与多孔钨一起钎焊时可采用 Mn－Ni－Co 钎料在氩和氢的保护下进行。钨与钽的钎焊可采用 Mn－Ni－Co、Ni－Cr－Si－B 和 Ni－Cr－Si－Mo 钎料在氩气保护下进行。若钼－钨接头的使用温度要求更高时，则需采用钎焊温度更高的钎料，如 Cr－V25 或纯金属铂、钯以及钯合金。钽和铌的活性比钼和钨都高，因此最好采用真空钎焊。在 1 000℃以下使用时可根据具体使用要求来选择钎料，但锰基钎料不适用于真空钎焊。适用于钽－铌真空钎焊的钎料有镍基、铜基和金基钎料等。银基钎料虽然也能用于钽－铌钎焊，但由于有使其接头变脆的倾向，故尽量不用。在更高温度（1 000－1 300℃）使用时可采用与钽和铌能形成无限固溶体的钛、钒或以这些金属为基的钎料。在钎焊钽和铌时最好先镀镍、铜或钯，并进行扩散退火。

4.4　难熔金属与其他有色金属的焊接

难熔金属与其他有色金属一起焊接时的特点，除难熔金属本身的一些特殊焊接性问题外，还必须考虑到难熔金属与不同有色金属组合在一起时的冶金相容性及其物理化学性能方面的差异。由于有色金属的种类很多，物理化学性能的差异也很大，因此不同种类的有色金属与不同难熔金属组合在一起进行焊接时的问题也相差很大。

4.4.1　钛、钒与难熔金属的焊接

钛、钒与铌、钽、钼、钨之间的冶金相容性都很好，不形成金属间化合物，应能很好地熔焊在一起。但由于它们的热物理性能相差大而使其熔化焊变得困难。例如铌、钽的熔点比钛的熔点分别高约 800℃和 1 000℃以上，它们的热导率约为钛的三倍；这就导致熔化焊钛与铌和钽时，熔化很难均匀。因此，在惰性气体保护室内进行焊接时，电弧应偏向难熔金属铌或钽的一侧，或采用钛熔化而铌和钽不熔化的熔焊－钎焊工艺。此外，当用电子束焊接时，也应采用类似的工艺。钛与钼和钨一起焊接时的冶金相容性类似于钛与铌和钽，但由于钼、钨本身的焊接性比铌、钽差很多，热影响区再结晶引起的脆化很严重。因此，从减少焊接热对母材的作用出发，钼或钨与钛一起焊接时不宜采用直接熔化焊，最好采用熔焊－钎焊工艺。如采用真空电子束焊将钛熔化后与钼或钨形成钎焊结合。

从降低焊接温度，避免再结晶引起金属脆化出发，真空扩散焊和钎焊最适合于它们的焊接。钛与钼可以在钼的再结晶温度以下，870～930℃的焊接温度范围内获得良好的扩散焊接头。在 850℃扩散焊接钽合金（Ta－10W）与钛合金（TC2）以及纯钽和钛合金（TC2）时可获得高强度和高塑性的接头。在钛与难熔金属进行钎焊时可以采用银基钎料或钛基钎料。但在钛与钽和铌钎焊时最好不采用银基钎料，以免钽和铌变脆。

4.4.2　锆、镍、铜与难熔金属的焊接

锆与铌之间的固溶度虽然有限，但并不形成脆性金属间化合物。因此，用熔化焊焊接锆与铌并不困难，常用的焊接方法为惰性气体保护焊和真空电子束焊。焊接时应将热源偏向高熔点和高热导率的铌。但锆与钼或钨组合在一起时，能生成脆性金属间化合物而不宜采用直接熔化焊，应采用真空扩散焊和钎焊。如采用 48Ti－48Zr－4Be 钎料的电子束钎焊可将 Zr－2 合金与钼连接在一起。当使用温度较低时，可采用铜基和银基钎料进行锆与钼和钨的钎焊。

镍与难熔金属铌、钽、钼、钨之间都能形成脆性金属间化合物，不能采用直接熔化焊，但可采用熔焊－钎焊以及真空扩散焊和真空钎焊等。如钼与可伐合金的搭接，可采用电子束焊－钎焊。为避免金属间化合物的产生，可采用铬或钛作中间层。镍与难熔金属的扩散焊并无太大困难。钼与镍可在950℃进行扩散连接。铌合金（Nb－1Zr）与镍基合金（Inconel718）可采用加镍箔中间层的扩散焊以及采用镍基非晶态钎料的真空钎焊。银基钎料和铜基钎料都能用于镍与钼和钨的钎焊。但在钎焊镍与钽和铌时最好不用银基钎料，以免钎焊金属变脆。

铜与钼和钨组合在一起焊接时，不仅熔点相差很大而且互不溶解，因此不能采用熔化焊。但可采用熔焊－钎焊的方法连接铜与钼，所得接头与铜等强。钼与铜直接扩散焊的结果不稳定。在重要的电子产品中，连接铜与钼时可在钼的表面镀一层 7～14 μm 厚的镍层后在 950～1 050℃进行扩散焊。因镍与铜和钼都能相互溶解。同样，钨与铜直接扩散焊时接头强度不高，采用镍作中间层时效果较好。铜与难熔金属钎焊时可采用银基和铜基钎料。如钨和钼的电极头与铜合金基体钎焊时可采用银基钎料。作为电阻焊电极头的80 W－2Cu 合金与基体 Cu－Ni 合金钎焊时也可采用银基钎料。

编写：任家烈（清华大学）



第 13 章　陶瓷的连接

1　工程结构陶瓷的种类、性能及应用

1.1　概述

陶瓷材料可以分为传统陶瓷和新型陶瓷，传统陶瓷主要的原料是石英、长石和黏土等自然界中存在的矿物，而新型陶瓷是各种金属与氧、氮和碳等经过人工合成的无机化合物材料。新型陶瓷是利用先进制粉与烧结技术，使之性能与传统陶瓷相比有了极大的提高，可以应用于工程领域。新型陶瓷包括结构陶瓷和功能陶瓷，结构陶瓷主要用于耐磨损、高强度、耐热、高硬度、高刚性、低热膨胀性和隔热等结构材料，功能陶瓷包括电磁功能、光学功能和生物化学功能等功能陶瓷材料。

陶瓷材料通常是由金属和非金属元素组成的化合物。陶瓷晶体是以离子键和共价键为主要结合键，一般是两种以上的不同键合的混合形式，表 4.13-1 是典型化合物陶瓷材料的结合键特点。离子键和共价键是强键，因而陶瓷具有高熔点、高硬度、耐腐蚀和无塑性等特点。表 4.13-2 比较了典型陶瓷材料与钢铁的熔点。

表 4.13-1　几种典型化合物陶瓷材料的结合键

化合物	LiF	MgO	Al_2O_3	SiO_2	Si_3N_4	SiC	Si
电负性/eV	3.0	2.3	2.0	1.7	1.2	0.7	0
离子键/%	89	73	63	51	30	11	0
共价键/%	11	27	37	49	70	89	100

表 4.13-2　典型陶瓷材料与钢铁的熔点与硬度

材料	熔点/℃	硬度 HK	材料	熔点/℃	硬度 HK
Al_2O_3	2 050	2 000	石墨(C)	3 700 ± 100	
MgO	2 800	1 220	金刚石(C)		7 000
ZrO_2(稳定)	2 600		Si_3N_4	1 900(分解)	1 700
TiO_2	1 830		BN(六方)	2 700 ~ 3 000(分解)	
B_4C	2 450	2 800	AlN	2 500	
SiC	2 200(分解)	2 550	$MoSi_2$	1 870	
ZrC	3530 ± 125	1 560	淬火钢		740
TiC	3 140	2 460	纯铁	1 646	
WC	2 867	1 880			

陶瓷材料一般为多晶体，其显微结构包括相分布、晶粒尺寸和形状、气孔大小和分布、杂质缺陷和晶界等。陶瓷材料由晶相、玻璃相和气相组成。晶相是陶瓷材料的主要组成相，决定陶瓷材料的物理化学性能；玻璃相是非晶态低熔点固体相，起黏结晶相、填充气孔、降低烧结温度等作用；气相和气孔是陶瓷材料在制备过程中不可避免留下的，气孔率增大陶瓷材料的致密度降低、强度和硬度降低；若玻璃相分布在主晶相界面，陶瓷材料在高温下的强度降低、易发生塑性变形，对陶瓷烧结体进行热处理，使晶界玻璃相重结晶或进入晶相成为固溶体，可显著提高陶瓷材料的高温强度。同一般金属相比，陶瓷材料的晶体结构复杂而表面能小，因此其强度、硬度、弹性模量、耐磨性和耐热性比金属优越，但塑性、韧性、可加工性、抗热震性以及使用可靠性不如金属。通过利用复相陶瓷强化与增韧技术（包括纤维、片晶、颗粒等增韧陶瓷技术）、陶瓷自韧化技术、金属间化合物增韧陶瓷技术、离子注入增韧陶瓷表面技术以及纳米增韧技术，使结构陶瓷的断裂韧度得以显著提高，使之应用范围得以扩大。

1.2　工程结构陶瓷及陶瓷基复合材料的种类、性能及用途

1.2.1　工程结构陶瓷

工程结构陶瓷以耐高温、高强度、超硬度、耐磨损、抗腐蚀等性能为主要特征，在冶金、宇航、能源、机械、光学等领域有重要应用，目前最常用的结构陶瓷主要有氧化铝、氮化硅、碳化硅以及部分稳定氧化锆（PSZ）陶瓷。

（1）氧化铝陶瓷

氧化铝陶瓷的主要成分是 Al_2O_3 和 SiO_2，Al_2O_3 含量越高则性能越好，但工艺更复杂、成本更高。氧化铝陶瓷的主要性能特点是硬度高（760℃时 HRA87、1 200℃仍可保持 HRA82），有很好的耐磨性，耐高温，可以在 1 600℃高温下长期使用，耐腐蚀性很强，还具有良好的电绝缘性能，在高频下的电绝缘性能尤为突出，每毫米厚度可耐压 8 000 V 以上。氧化铝陶瓷的缺点是韧性低，抗热震性能差，不能承受温度的急剧变化。表 4.13-3 是氧化铝陶瓷的基本性能。氧化铝的主要用途是用于制作刀具、模具、轴承、熔化金属的坩埚、高温热电偶套管等，以及用做化工零件，如化工用泵的密封滑环、机轴套、叶轮等。

表 4.13-3　氧化铝陶瓷的主要性能

主要成分		$Al_2O_3$92	$Al_2O_3$96	$Al_2O_3$99
密度/$g·cm^{-3}$		3.6	3.75	3.90
抗压强度/MPa		2 354	2 452	2 630
抗弯强度/MPa		314	343	490
弹性模量/GPa		304	304	382
线胀系数 /$10^{-6}K^{-1}$	25 ~ 300℃	6.6	6.7	6.8
	25 ~ 700℃	7.5	7.7	8.0
传热系数 /W·$(cm·K)^{-1}$	25℃	0.168	0.218	0.314
	300℃	0.109	0.126	0.159
熔点/℃		—	—	2 025
电阻率 /Ω·cm	20℃	> 1 014	> 1 014	> 1 014
	300℃	1 × 1 011	3 × 1 011	< 1 014
	500℃	3 × 108	4 × 109	3 × 1 012
介电强度/$kV·mm^{-1}$		15	14	15

为了改善 Al_2O_3 的韧性和抗热震性，经常在材料中加入其他化合物或金属元素，形成复合型 Al_2O_3 陶瓷材料，表 4.13-4 是热压 Al_2O_3 及几种 Al_2O_3 复相陶瓷的主要物理力学性能。复相 Al_2O_3 陶瓷材料在高性能陶瓷刀具中得到了广泛的应用。

（2）氮化硅陶瓷

氮化硅陶瓷的制造方法主要有反应烧结与热压烧结两种。氮化硅陶瓷的主要性能特点是强度高、热压氮化硅陶瓷



表 4.13-4　热压 Al_2O_3 及几种 Al_2O_3 复相陶瓷的物理力学性能

主要性能	热压 Al_2O_3	热压 Al_2O_3 + Me	热压 Al_2O_3 + TiC	热压 Al_2O_3 + ZrO_2	热压 Al_2O_3 + SiC（w）
密度 /$g\cdot cm^{-3}$	3.4～3.99	5.0	4.6	4.5	3.75
熔点/℃	2 050	—	—	—	—
抗弯强度 /MPa	280～420	900	800	850	900
硬度/HRA	91	91	94	93	94.5
传热系数 /$W\cdot(cm\cdot K)^{-1}$	0.04～0.045	0.33	0.17	0.21	0.33
平均晶粒尺寸/μm	3.0	3.0	1.5	1.5	3.0

由于组织致密、气孔率可接近为零，室温强度可高达 800～1 000 MPa，加入某些添加剂后抗弯强度还可达 1 500 MPa。

氮化硅陶瓷的硬度很高，仅次于金刚石、立方氮化硼、碳化硼等几种物质，氮化硅陶瓷的摩擦系数仅为 0.1～0.2，相当于加油润滑的金属表面，在无润滑的条件下工作氮化硅陶瓷是一种极为优良的耐磨材料。

氮化硅陶瓷的抗热震性能好，反应烧结氮化硅陶瓷的热膨胀系数仅为 2.53×10^{-6}/℃，其抗热震性能大大高于其他陶瓷材料。

氮化硅陶瓷的结构稳定，不易与其他物质反应，能耐除熔融的 NaOH 和 HF 外的所有无机酸和某些碱溶液的腐蚀，抗氧化温度可达 1 000℃。

表 4.15-5 是氮化硅陶瓷的主要性能。

表 4.15-5　氮化硅陶瓷的性能

性　　质	反应烧结	热压烧结
熔点（分解点）/℃	1 900（升华）	1 900（升华）
密度/$g\cdot cm^{-3}$	2.2～2.6	3～3.2
硬度 HRA	80～85	91～93
弹性模量/GPa	160～180	320
断裂韧度KIC/$MPa\cdot m^{1/2}$	2.85	4.5～10
抗弯强度（室温）/MPa	200～1 000	650～1 000
线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	2.7～3.1	3.0～3.2
传热系数(25℃)/$W\cdot(cm\cdot K)^{-1}$	0.126～0.14	0.296～0.30
电阻率(20℃)/$\Omega\cdot cm$	>1 013	>1 013

反应烧结和气压烧结的氮化硅材料已经批量生产，在刀具、发动机零部件、密封环等领域广泛应用；热压制成的氮化硅基陶瓷刀具在切削冷硬铸铁时切削寿命可以达到硬质合金 YG8 的 30 倍。日本生产的汽车发动机陶瓷挺柱已经投入市场，日本还计划用 5 年时间研究采用新型陶瓷材料制造飞机发动机零部件（包括涡轮叶片、燃烧器壁等各种零部件），预计这种飞机发动机的能源利用率将比普通飞机发动机高大约 30%。

（3）碳化硅陶瓷

碳化硅陶瓷的制造方法有反应烧结、热压烧结与常压烧结三种。碳化硅陶瓷的最大特点是高温强度高，在 1 400℃时抗弯强度仍保持在 500～600 MPa 的较高水平。碳化硅陶瓷有很好的耐磨损、耐腐蚀、抗蠕变性能，热传导能力强，在陶瓷中仅次于氧化铍陶瓷。表 4.15-6 是碳化硅陶瓷的主要性能。

碳化硅基复相陶瓷的高温力学性能优异，可用于制作燃

表 4.15-6　碳化硅陶瓷的主要性能

性　　质	热压烧结	常压烧结
熔点（分解点）/℃	2 600（分解）	2 600（分解）
密度/$g\cdot cm^{-3}$	3.2	3.0
硬度HRA	93	90～92
弹性模量/GPa	450	405
断裂韧度 K_{IC}/$MPa\cdot m^{1/2}$	—	4
抗弯强度（室温）/MPa	780～900	450
线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	4.6～4.8	4
热导率(25℃)/$W\cdot(cm\cdot K)^{-1}$	0.81	0.43
电阻率(20℃)/$\Omega\cdot cm$	>1 014	>1 014

气轮机叶片、涡轮增压器叶片和燃烧器部件。在钢铁工业中用作高速线材轧制的导轮，实际使用温度为 1 000℃，过钢量为普通导轮的 5～20 倍。

（4）部分稳定氧化锆陶瓷（PSZ）

ZrO_2 有三种晶型：立方结构（C 相）、四方结构（t 相）和单斜结构（m 相），加入适量的稳定剂后，t 相可以部分地以亚稳定状态存在于室温，称为部分稳定氧化锆，简称 PSZ。在应力作用下发生的 t→m 马氏体转变称为"应力诱发相变"，这种相变过程将吸收能量，使裂纹尖端的应力场松弛，增加裂纹扩展阻力，从而实现增韧。部分稳定氧化锆的断裂韧度远高于其他结构陶瓷，目前发展起来的几种氧化锆陶瓷中，常用的稳定剂包括 MgO、Y_2O_3、CaO、CeO_2 等。它们的主要力学性能如表 4.15-7 所示。

表 4.15-7　几种氧化锆陶瓷的力学性能

种　　类	抗弯强度/MPa	断裂韧度/$MPa\cdot m^{1/2}$
高强型 Mg－PSZ	800	10
抗震型 Mg－PSZ	600	8～15
Y－TZP	800～1 200	10
热压烧结 TZP－Al203 复合陶瓷	2 400	17

氧化锆增韧陶瓷在室温下使用可最大限度发挥其优点，氧化锆增韧陶瓷磨球已批量生产，除此之外还用作缸套、活塞头、气门座和凸轮随动件以及球阀与阀座、陶瓷轴承和电器调试工具等等。

1.2.2　陶瓷基复合材料

陶瓷材料虽然具有耐高温、高温强度高、抗氧化、抗高温蠕变性能好，高硬度、高耐磨性、热膨胀系数小以及耐化学腐蚀等一系列优越的性能特点，但也存在致命的弱点，即脆性，它不能承受激烈的机械冲击和热冲击，这限制了它的应用。而用粒子、晶须或纤维增韧增强的陶瓷基复合材料，则可使其脆性大大改观。陶瓷基复合材料（CMC）是目前备受重视的新型耐高温结构材料。

目前颗粒和晶须增韧陶瓷的效果仍然比较有限（如表 4.15-8），而连续纤维增韧的陶瓷基复合材料由于其独特的增韧机理可以大幅度地提高陶瓷材料的断裂韧度，尤其是近年来在陶瓷增强纤维及陶瓷基复合材料的制备工艺的进展，使其具有广阔的应用前景。

表 4.15-8　几种碳化硅陶瓷材料的力学性能

材　　料	SiC	TiC_p/SiC	SiC_w/SiC	SiC_f/SiC
抗弯强度/MPa	500	418	595	750
断裂韧度/$MPa\cdot m^{1/2}$	4	6.2	6.7	25

目前已用于工业化的陶瓷基复合材料的增强纤维主要有四类，如表 4.15-9 所示。

表 4.15-9　增强纤维的性能

纤维类型	品　种	厂　　家	纤维组成	密度/g·cm^{-3}	强度/GPa	模量/GPa	直径/μm
氧化铝纤维	FP	杜邦	>99%$\alpha-Al_2O_3$	3.9	1.38	380	21
	PRD166	杜邦	Al_2O_3，ZrO_2	4.2	2.07	380	21
	Sumitomo	住友	85 Al_2O_3，$15SiO_2$	3.9	1.45	190	17
	Nextel312	3M	$62Al_2O_3$，$14B_2O_3$.$24SiO_2$	2.7	1.75	154	11
	Nextel440	3M	$70Al_2O_3$，$20SiO_2$.$2B_2O_3$	3.1	2.1	189	12
	Nextel480	3M	$70Al_2O_3$，$28SiO_2$.$2B_2O_3$	3.1	2.3	224	12
碳化硅纤维	SCS－2	AVCO/Textron	C芯，表面C涂层	3.05	3.45	407	140
	SCS－6	AVCO/Textron	C芯，表面 C，SiC涂层	3.05	3.45	410	142
	Sigma	Berghof	C芯 SiC	3.4	3.45	410	100
	Nicalon	日本炭素公司	Si－C－O	2.55	2.8	200	10
	Tyranno	日本宇部	Si－C－Ti－O	2.5	2.76	193	10
	MPS	Dow Cornig/Celanese	Si－C－O	2.6	1.4	210	12
氮化硅纤维	TNSN	东亚燃料工业公司（日）	Si－N－O	2.5	3.3	296	10
	Fiberamics	Rhone－Poulene	Si－C－N－O	2.4	1.8	220	15
	MPDZ	Dow Cornig	Si－C－N－O	2.3	2.1	210	10
	HPZ	Dow Cornig	Si－C－N－O	2.35	2.45	210	10
碳纤维	T300R	Amoco	C	1.8	2.76	276	10
	T40R	Amoco	C	1.8	3.45	276	10

氧化铝系列（包括莫来石）纤维的高温抗氧化性能优良，有可能用于1 400℃以上的高温场合。但目前作为连续纤维增强材料主要存在两个问题：一是高温下晶体相变、粗化及玻璃相蠕变，导致纤维的高温强度下降；二是在高温成型和使用过程中，氧化物纤维易与陶瓷基体（尤其是氧化物陶瓷基体）形成强结合的界面，导致复合材料的脆性破坏，从而丧失了纤维的增韧作用。

碳化硅纤维有两类，一种是由化学气相沉积法制备的CVD－SiC纤维，这种纤维的高温性能好，但由于直径太粗（>100 μm）不利于成型复杂形状的陶瓷基复合材料构件，而且价格昂贵，因而应用受到限制。另一种是由有机聚合物先驱体转化法制备的SiC纤维，它的一个共同特点是纤维中不同程度地含有氧和游离碳杂质，导致其高温性能受到影响，1000℃温度下即出现较大的强度下降。

氮化硅系列纤维实际上是由Si、N、C、O组成的复相纤维，已有商品出售。这类纤维也是由有机聚合物先驱体转化法制备的，目前也存在着先驱体碳化硅纤维同样的问题，因而性能也与之相近。

碳纤维是目前开发最成熟、性能最好的纤维之一，已被广泛用作复合材料的增强纤维，其高温性能也非常突出，在惰性气氛中，在2 000℃以上保持强度不下降，是目前增强纤维中高温性能最好的一种。但是，碳纤维的最大弱点是高温抗氧化性能差，在空气中360℃以上即出现氧化失重和强度下降，采取纤维表面涂层的方法可以解决这一问题。因此，涂层碳纤维是连续纤维增强的陶瓷基复合材料的最佳候选材料。

陶瓷基复合材料的基体可以根据不同的使用要求和条件来选择，主要有玻璃基、氧化物类陶瓷基、碳化物类与氮化物类陶瓷基。

玻璃基复合材料的优点是易于制作且增韧效果好。典型的复合体系有C_f/石英玻璃、Nicalon/LAS复合材料，C_f/石英玻璃增韧前后，σ_f 从51.5 MPa提高到600 MPa，断裂功从5.9～11.3 J/m^2 提高到 7.9×10^3 J/m^2；Nicalon/LAS复合材料可使 K_{IC} 从2 MPa·m$^{1/2}$ 提高到17 MPa·m$^{1/2}$。玻璃基复合材料的致命缺点是由于玻璃相的存在而容易产生高温蠕变，同时玻璃相还容易向晶态转化而发生析晶，使性能受损，这样使用温度亦受到限制。

氧化物基陶瓷的基体主要有：MgO、Al_2O_3、SiO_2、ZrO_2以及莫来石等，这些材料均不宜于在高应力与高温环境中使用，因为Al_2O_3和ZrO_2的抗热震性较差；SiO_2存在高温蠕变和相变；莫来石虽然有较低的热膨胀系数和良好的抗蠕变性能，但使用温度也不能超过1200℃。

非氧化物陶瓷如Si_3N_4、SiC等由于具有较高的强度、弹性模量和抗热震性能及优异的高温力学性能而受到人们的



重视。

目前应用较多的是以 Si_3N_4、SiC、ZrO_2、Al_2O_3 等陶瓷为基的复合材料。另外，新发展的高性能纳米复合陶瓷也是很有希望的一种复合材料。

2　陶瓷材料的焊接性问题

2.1　陶瓷材料焊接的一般问题

由于陶瓷材料与金属的原子键结构的根本不同，加上陶瓷本身特殊的物理化学性能，因此，无论是与金属连接还是陶瓷本身的连接都存在不少的特点与难点。

1）陶瓷材料主要有离子键和共价键，表现出非常稳定的电子配位，通过熔焊使金属与陶瓷产生接触通常是不可能的，也很难被熔化的金属所润湿。因此，在进行钎焊时需要对陶瓷进行金属化处理或用活性钎料进行钎焊才能获得可靠的钎焊接头。

2）陶瓷的热膨胀系数小，与金属的热膨胀系数相差较大，通过加热连接陶瓷与金属（或用金属中间层连接陶瓷）时，接头中会产生残余应力，削弱了接头的力学性能，严重时还会导致连接后接头的破坏开裂。因此，在进行陶瓷与金属的连接或用金属中间层连接陶瓷时，还要考虑接头的热应力问题。

3）由于陶瓷的热导率低、耐热冲击能力弱，集中加热时尤其是在用高能密度热源进行熔焊时很容易产生裂纹。因此，在焊接时应尽可能地减小焊接部位及其附件的温度梯度，并控制加热冷却速度。

4）陶瓷的熔点高，硬度与强度高，不容易变形，陶瓷的直接扩散焊比较困难，要求被焊件表面非常平整与清洁，而且直接扩散焊的温度都很高，时间也比较长，如 Si_3N_4 陶瓷直接扩散焊时，要求被焊表面加工到粗糙度优于 0.1 μm，焊接温度高达 1 500 ~ 1 750℃，因此通常都采用间接扩散焊接方法，使用中间层以降低连接温度，而且金属的塑性变形可以降低对陶瓷表面的加工要求。

5）大部分陶瓷的导电性很差或基本上不导电，很难采用电焊方法进行连接，一般要采取特殊的措施。

2.2　陶瓷基复合材料的连接问题

陶瓷基复合材料的连接不仅具有连接陶瓷材料时的难点，如高熔点及有些陶瓷的高温分解使熔焊困难、多数陶瓷的电绝缘性使之不能用电弧或电阻焊进行焊接、陶瓷的固有脆性使之无法承受焊接带来的热应力、陶瓷材料的塑性缺乏使之无法用需要施加大压力的方法进行固相连接、陶瓷的化学惰性使之因不易润湿而造成钎焊困难等等，还应注意连接异种材料时的问题，如选择连接方法与材料时要同时考虑对基体材料与加强材料的适应性。另外在连接陶瓷基复合材料时还应考虑避免加强相与基体之间的不利反应以及不能造成加强相如纤维的氧化与性能的降低等，因此连接时间与温度一般都不能太高或太长，如 1 425℃下用 Si 作连接材料连接 SiC_f/SiC 复合材料时，保温时间为 45 min 时使 SiC 性能严重降低，而将保温时间降为 1 min 后，基体的性能基本上不受影响。除此之外，由于纤维增强的陶瓷基复合材料的耐压性能较差，因而连接时不能施加较大的压力。

3　陶瓷连接的方法

随着陶瓷材料的发展及其在工业中应用的扩大，相继开发出了各种连接方法，包括钎焊法、熔焊法、固相连接法以及超声波压接、摩擦压接、过渡液相连接、微波连接、粘接以及机械连接等方法。这些连接方法中，直接钎焊、扩散焊方法比较成熟、应用较多，熔焊、过渡液相连接方法以及反应成形与反应烧结连接方法正在继续开发和研究，这里主要介绍应用较多的直接钎焊与固相扩散焊方法以及研究较多的过渡液相连接方法和反应成形连接方法等。

3.1　直接钎焊法

陶瓷材料主要有离子键和共价键，表现出非常稳定的电子配位，要使陶瓷表面被金属键的金属钎料润湿，在钎料和陶瓷之间必须要有化学反应发生，通过反应陶瓷表面分解形成新相，产生化学吸附机制，才能形成强的界面结合。

过渡金属如 Ti、Zr、Hf、Nb、Ta 等，通过化学反应可以在陶瓷表面产生分解，形成反应层，反应层主要由金属与陶瓷的复合物组成，这些产物大部分情况下表现出与金属相同的结构，因此可以被熔化的金属润湿。

活性钎料中常以 Ti 作为活性元素，在国外的商品化钎料中，如 Ag、Cu 或 Ag-Cu 共晶中含 Ti 量在 1% ~ 5%之间，有些钎料中还含有 In，以改善流动性和提高活性元素的活度。除 Ag、Cu 钎料外，还有一些以 Sn 或 Pb 为基的活性钎料，它们的熔点在 300℃以下。常用的几种高温活性钎料的成分及其熔点见表 4.13-10。

表 4.13-10　常用的几种高温活性钎料

钎　料	成分（质量分数）/%	熔点/℃
Ti-Cu	Ti50，Cu50	960
Ag-Cu-Ti	Ti/5~6，Ag-Cu/72-28 余量	779
	Ti7.5，Ag-Cu/72-28 余量	779
Ti-Ni	Ti71.5，Ni28.5	942

活性钎焊时，活性元素的保护是非常重要的一个方面，这些元素极易被氧化，被氧化后就不能再与陶瓷发生反应，因此活性钎焊一般都在真空或纯度很高的保护气体中进行，钎焊温度下真空度一般应保证优于 10^{-2} Pa。

最灵活方便的钎料使用方法是用 50 ~ 200 μm 的箔状钎料，箔状钎料的优点是：①形状、尺寸容易与接头配合。②与粉状钎料相比使用简单。③真空中钎焊时活性元素被事先氧化的可能性小，活性元素均匀地分布在基体中，可以很好地被保护。

钎焊温度（一般在钎料的液相线温度以上 50 ~ 100℃）与保温时间都显著影响接头质量，钎焊温度一般在 800 ~ 1 100℃之间，即使是低熔点的 Sn 基钎料或 Pb 基钎料，由于需要足够的热力学活性，也要在这么高的温度下钎焊。

目前应用较多的陶瓷有 ZrO_2、Al_2O_3、Si_3N_4、SiC 以及 AlN，市售的 Ag-，Cu-，Ag-Cu 基活性钎料均可以很好地润湿和连接这些陶瓷。

陶瓷钎焊时还应该注意热应力问题。在靠近界面的陶瓷边缘是产生高应力水平的区域，控制应力的方法之一是控制钎焊过程，冷却速度降低有利于应力松弛而使应力减小。通常靠降低冷却速度还不能解决应力问题，一个成功的方法是应用金属中间层，使用塑性材料或热膨胀系数适合于陶瓷的材料或二者兼而有之可以有效地降低陶瓷中的应力。塑性材料是通过塑性变形而使陶瓷中的应力降低，低热膨胀系数材料的中间层则将陶瓷中的应力部分转入中间层中。复合使用两种不同的中间层材料是降低热应力的有效方法。日本 NGK 生产的涡轮转子就使用了这种方法：陶瓷叶片与超合金金属轴之间使用了多层中间层结构，薄 Ni 片作为塑性金属，W 作为低热膨胀系数材料的使用。

用不同的活性钎料钎焊的各种陶瓷接头的性能如表 4.13-11 所示，而用 AgCuTi 钎料钎焊的几种常见工程陶瓷的



接头性能见表 4.13-12。

表 4.13-11 不同钎料钎焊的各种接头的四点弯曲平均强度

接头组合	钎料	平均抗弯强度/MPa
$Si_3N_4-Si_3N_4$	AgCuTi3	225.2 m[①] = 3.9
$Si_3N_4-Si_3N_4$	AgCuTi5	184.2
$Si_3N_4-Si_3N_4$	AgCuZr5	108.7
$Si_3N_4-Si_3N_4$	AgCuHf5	130.1 $m=2.9$
$Si_3N_4-Si_3N_4$（预金属化）	PdNiTi3	163 $m=3.7$
SiC - SiC	AgCuTi3	85.2 $m=2$
SiC - SiC	AgCuTi5	107.3
SiC - SiC	AgCuZr3	52
SiC - SiC	CuPtNb3	65
SiC - SiC	AuPdTi2	167 $m=3.9$
AlN - AlN	CuSiAlTi2.25	98.5
AlN - AlN	AgCuTi3	168.9
$Al_2O_3-Al_2O_3$	AgCuTi3	225
Al_2O_3 - FeNiCo	AgCuTi3	182
$Si_3O_4-AlSi_3O_4$	AgCuTi3	84 $m=1.6$
$Si_3O_4-AlSi_3O_4$	AgCuZr3	$m=1.6$
$Si_3O_4-AlSi_3O_4$	AgCuHf4	148 $m=3.9$
AlN - FeNiCo	AgCuTi5	36.5
Si_3O_4 - FeNiCo	AgCuTi5	186
SiC - FeNiCo	AgCuTi3	35

① m 为维泊尔模数。

表 4.13-12 Ag - Cu - Ti 钎料钎焊各种陶瓷与陶瓷或陶瓷与金属接头的强度

被连接材料	连接强度/MPa	被连接材料	连接强度/MPa
Si_3N_4 - 1Cr13	弯曲 385 ~ 415	AlN - 铜	拉伸 50 ~ 110
Si_3N_4 - 40Cr	弯曲 400	95 瓷 - 95 瓷	拉伸 > 90.8
PSZ - 1Cr13	弯曲 377 ~ 514	95 瓷 - 无氧铜	拉伸 84.9 ~ 95.5
PSZ - 40Cr	弯曲 407	95 瓷 - 可阀	拉伸 76.4 ~ 105.7
SiC - SiC	弯曲 350	Al_2O_3 - Fe41Ni	剪切 265

3.2 陶瓷的固相扩散连接

固相扩散连接最初用于连接异种材料，目前也是连接陶瓷材料的最常用方法之一，可以直接连接或使用中间层进行连接。

影响扩散连接接头强度的主要因素包括连接温度、连接时间、施加的压力、环境介质、被连接面的表面状态以及被连接材料之间的化学反应和物理性能（如热膨胀系数）的匹配程度。

1）连接温度的影响　温度是扩散连接的最重要参数，在热激活过程中，温度对过程的动力学影响显著，连接金属与陶瓷时温度一般达到金属熔点的 90% 以上。温度通过影响反应层的形成及其厚度而影响接头的强度，偏低和偏高均不利于接头性能。

2）扩散焊接时间的影响　扩散焊接时间不仅影响反应层的厚度，还影响反应的产物，从而影响接头的性能，在一定的扩散温度下，存在一个合适的保温时间范围，保温时间过长或过短均对接头性能不利。

3）施加压力大小的影响　固相扩散焊时施加压力是为了产生塑性变形减小表面不平整和破坏表面氧化膜，增加表面接触，为原子或分子的扩散提供条件。但是，为了防止构件发生大的变形，连接时所加的压力一般较小，约在 0 ~ 100 MPa。压力较小时，增大压力一般可以使接头强度提高，但与温度和时间的影响一样，压力也存在最佳压力规范以获得最佳强度。另外，压力的影响还与材料的类型、厚度以及表面氧化状态有关。

4）环境气氛的影响　连接环境的气氛对接头性能也有一定的影响，一般情况下，真空连接的接头强度要高于氩气和空气中连接的接头强度。

5）热膨胀系数不匹配的影响　热膨胀系数的不匹配对接头性能的影响也很显著。陶瓷与金属连接时，一般陶瓷的热膨胀系数比较低，因此通常陶瓷中受压、金属中受拉。塑性中间层的使用会使接头中的应力分布复杂化。用 Al 作中间层连接氧化铝陶瓷与金属时，接头强度随金属热膨胀系数的增大单调降低。在连接SiC、Si_3N_4和SIALON陶瓷时也存在同样的现象。因此，用热膨胀系数较小的金属（如Invar、Inconel或Nimonic合金）与陶瓷连接可以获得应力较小的接头。

6）中间层的影响　固相扩散连接时使用中间层是为了降低连接温度、连接时施加的压力和减少连接时间，以促进扩散和去除杂质元素，同时也为了降低界面产生的残余应力。一般而言，中间层厚度增大残余应力降低，中间层金属与陶瓷的热膨胀系数接近时其降低应力的作用明显。但是中间层的影响有时比较复杂，如果界面有反应产生，则中间层的作用会因反应物类型与厚度的不同而有所不同。中间层的选择很关键，选择不当会引起接头性能的恶化，如由于化学反应激烈形成脆性反应产物而使接头强度降低，或由于热膨胀系数的不匹配而增大残余应力，或使接头耐腐蚀性能降低。

中间层可以以不同的形式加入，通常以粉状、箔状或通过金属化加入。

7）表面状态的影响　表面粗糙度对接头强度的影响十分显著，表面粗糙会在陶瓷中产生局部应力集中而容易引起脆性破坏。Si_3N_4-Al焊接时，表面粗糙度由 0.1 μm 变为 0.3 μm时，接头强度从 470 MPa 降低到 270 MPa。

8）焊后退火的影响　Si_3N_4 陶瓷在 1 500℃、加压 21 MPa，保温 60 min、1 MPa 的氮气中进行直接扩散焊时，界面还不能完全消失，经过 1 750℃保温 60 min 的退火处理后可以显著改善界面组织提高接头强度，使接头的室温强度从 380 MPa 提高到 1 000 MPa 左右，达到与陶瓷母材相同的强度。

9）各种接头固相扩散焊的工艺参数及其接头性能　Al_2O_3、SiC、Si_3N_4及WC等陶瓷开发较早、发展比较成熟，开展连接研究已有较长的时间，从资料中可以查到大量的工艺参数，而 AlN、ZrO_2 陶瓷发展得相对较晚，它们的连接技术目前正处于研究之中，但也能查到一些数据。表 4.13-13 为各种材料组合固相扩散焊的参数及其接头性能。

3.3 陶瓷的过渡液相连接

用于连接陶瓷的过渡液相连接严格来说应该称为局部过渡液相连接（PTLPB—partial transien tliquid phase bonding），它是从传统的 TLPB 发展而来的。TLPB 的优点是在较低温度和较低连接压力下形成接头，可以避免母材组织和性能的不利



表 4.13-13　各种陶瓷材料组合固相扩散焊参数及其性能

材料组合	温度/℃	时间/min	压力/MPa	中间层及厚度	环境气氛	强度①/MPa	K_{IC}/MPa·m$^{1/2}$
Al_2O_3 - Ni	1 350	20	100	—	H_2	200^b（A）	—
Al_2O_3 - Pt	1 550	1.7 ~ 20	0.03 ~ 10	—	H_2	200 ~ 250（A）	—
Al_2O_3 - Al	600	1.7 ~ 5	7.5 ~ 15	—	H_2	95（A）	—
Al_2O_3 - Cu	1 025 ~ 1 050	155	1.5 ~ 5	—	H_2	153^b（A）	—
Al_2O_3 - Cu4Ti	800	20	50	—	真空	45^b（T）	—
Al_2O_3 - Fe	1 375	1.7 ~ 6	0.7 ~ 10	—	H_2	220 ~ 231（A）	—
Al_2O_3 - 低碳钢	1 450	120	< 1	Co	真空	3 ~ 4（S）	—
Al_2O_3 - 低碳钢	1 450	240	< 1	Ni	真空	0（S）	—
Al_2O_3 - 高合金钢	625	30	50	0.5 mmAl	真空	41.5^b（T）	—
Al_2O_3 - Cr	1 100	15	120	—	真空	57 ~ 90^b（S）	—
Al_2O_3 - Pt - Al_2O_3	1 650	240	0.8	—	空气	220（A）	—
Al_2O_3 - Cu - Al_2O_3	1 025	15	50	—	真空	177（B）	2.24
Al_2O_3 - Ni - Al_2O_3	1 350	30	50	—	真空	149（B）	3.70
Al_2O_3 - Fe - Al_2O_3	1 375	2	50	—	真空	50（B）	0.83
Al_2O_3 - Ni - Al_2O_3	1 250	300 ~ 600	15 ~ 20	—	真空	75 ~ 80（S）	
Al_2O_3 - Ag - Al_2O_3	900	300	6	—	真空	68（S）	
Al_2O_3 - Cu - Al_2O_3	1 000	120	6	—	真空	50（S）	
Si_3N_4 - Invar	727 ~ 877	7	0 ~ 0.15	0.5 mmAl	空气	110 ~ 200（A）	—
Si_3N_4 - Nimonic 80A	1 100	6 ~ 60	0 ~ 50	—	真空	—	—
Si_3N_4 - Nimonic 80A	1 200			Cu，Ni，Kovar			
Si_3N_4 - Si_3N_4	770 ~ 877	10	0 ~ 0.15	10 ~ 20 μmAl	空气	320 ~ 490（B）	
Si_3N_4 - Si_3N_4	1 550	40 ~ 60	0 ~ 1.5	ZrO_2	真空	175（B）	
Si_3N_4 - Si_3N_4	1 500	60	21	无	1 MPa 氮气	380（A），室温 230（A），1 000℃	
Si_3N_4 - Si_3N_4	1 500	60	21	无	0.1 MPa 氮气	220（A），室温 135（A），1 000℃	
Si_3N_4 - WC/Co	610	30	5	Al	真空	208^b（A）	
Si_3N_4 - WC/Co	610	30	5	Al - Si	真空	50^b（A）	
Si_3N_4 - WC/Co	1 050 ~ 1 100	180 ~ 360	3 ~ 5	Fe - Ni - Cr	真空	> 90（A）	
Si_3N_4 - Al - Si_3N_4	630	300	4	—	真空	100（S）	
Si_3N_4 - Ni - Si_3N_4	1 150	0 ~ 300	6 ~ 10	—	真空	20（S）	
Si_3N_4 - Invar - AISI316	1 000 ~ 1 100	90 ~ 1 440	7 ~ 20	—	真空	95（S）	
SiC - Nb	1 400	30	1.96	—	真空	87（S）	
SiC - Nb - SiC	1 400	600			真空	187（室温） ≥100（800℃）（S）	
SiC - Nb - SUS304	1 400	60			真空	125	
SiC - SUS304	800 ~ 1 517	30 ~ 180			真空	0 ~ 40	
AlN - AlN	1 300	90	—	25 μm V	真空	120（S）	
ZrO_2 - Si_3N_4	1 000 ~ 1 100	90	> 14	> 0.2 mm Ni	真空	57（S）	
ZrO_2 - Cu - ZrO_2	1 000	120	6		真空	97（S）	
ZrO_2 - ZrO_2	1 100	60	10	0.1 mm Ni	真空	150（A）	
ZrO_2 - ZrO_2	900	60	10	0.1 mm Cu	真空	240（A）	

① 强度值后面的括号中的字母代表各种性能试验方法，A 代表四点弯曲试验，B 代表三点弯曲试验，T 代表拉伸试验，S 代表剪切试验。上标 b 代表最大。



变化和试件的变形，但在连接陶瓷时由于陶瓷中的扩散困难，因此低熔点物质的消耗很难靠陶瓷来进行，一般都用多层复合中间层来实现。

1）中间层设计时的考虑　复合中间层一般是由一薄层低熔点金属或合金（或可以通过反应形成低熔点物质）熔敷在相对较厚的高熔点核心层上组成，高熔点核心层要能够消耗低熔点层形成合适的高熔点合金或反应产物。这种方法具有液相和固相连接的优点：低熔点薄层使之像钎焊，被焊表面加工要求不必太苛刻。通过中间层的合理设计，可以使液膜数量少，而且在需要的部位产生，而后低熔点金属扩散进入高熔点材料并与之反应，使液相消失，形成的合金或中间层的性质取决于高熔点核心材料的物理性质，如果需要还可以在高温下不加压进行退火，通过互扩散而使产物均匀化。

在设计中间层时还要考虑金属元素之间的反应和平衡相，金属元素结合会形成脆而且缺陷较多的反应产物而使性能受到影响。由于用于连接陶瓷的中间层一般至少两层、所以设计中间层时要参考二元相图或更高组元的相图。

除要考虑中间层金属元素之间的反应外，还要考虑金属元素与陶瓷之间的反应，反应产物也可能降低接头力学性能和耐高温性能，金属与陶瓷之间的反应可能带来新的组元进入合金中使性能改变或出现新相，尤其是在连接 Si 基陶瓷时，当氮化物的反应层比氮化硅更稳定或碳化物比碳化硅更稳定时，则分解的硅可能进入核心层中使之合金化，提高强度或者与之反应形成硅化物。

2）PTLPB 方法连接各种陶瓷的条件及其接头的四点抗弯强度如表 4.13-14 所示。

表 4.13-14　PTLP 方法连接各种陶瓷的条件及其接头的四点抗弯强度

陶　瓷	连 接 材 料	温度/℃	时间/h	压力/MPa	环境	强度/MPa
Al_2O_3	3 μm Cu/127 μm Pt/3 μm Cu	1 150	6	5.1	真空	160 ± 60
Al_2O_3	3 μm Cu/Nb/3 μm Cu	1 150	6	5.1	真空	181
Al_2O_3	3 μm Cu/100 μm Ni/3 μm Cu	1 150	6	—	真空	160 ± 63
Al_2O_3	Cu/80Ni20Cr/Cu	1 150	6	—	真空	230 ± 19
Si_3N_4	4 μmAuCuTi/25 μm Ni/4 μmAuCuTi	950	2	—	真空	770 ± 200 ~ 380（650℃）
Si_3N_4	4 μmAuCuTi/25 μm Ni/4 μmAuCuTi	1 000	4	—	真空	~ 770 ± 200
Si_3N_4	2.5 μmAu/25，125 μm Ni/2.5 μmAu	1 000	4	0.5，5	真空	272
SiC	CuAuTi/Ni/CuAuTi	950	—	—		260 ± 130
Si_3N_4	2.5 μm Au/125 μm Ni – 22Cr/2.5 μmAu	1 000	4	—	真空	272
RBSiC	0.4 mmAl	1 000	0.5			270 ± 50
RBSiC	0.4 mmAl	800	1.5			250 ± 50
RBSiC	0.4 mmAl	1 000	1.5			230 ± 100 220 ± 10（700℃）

3.4　反应成形法连接陶瓷

反应成形连接方法是从 SiC 反应成形中发展起来的、目前主要用于连接 SiC 基陶瓷及纤维增强的复合材料的一种连接技术，主要是要克服用金属中间层钎焊或扩散焊陶瓷时、接头的使用温度低于母材、以及因金属与陶瓷母材热膨胀系数的不匹配而产生应力使接头性能削弱的不足。

反应成形连接方法的独特之处在于产生的接头组织是可设计的，尤其是接头中间层的热及力学性能对 SiC 材料而言是可设计的。另外，在连接温度（或浸润 infiltration 温度）下不需要高温卡具来装卡试件，因此这种方法不仅可以用于连接陶瓷，还可以用于修补陶瓷件。

反应成形的连接工艺：先将含碳的化合物置于接头区域，将试件装在卡具中，110 ~ 120℃之间干燥 10 ~ 20 min，使被焊件粘接在一起。将 Si 或含 Si 合金做成片状、膏状或悬浮液状放到接头区域，然后根据浸润类型加热到 1 250 ~ 1 425℃保温 10 ~ 15 min，熔化的 Si 或 Si – refractory 金属合金与碳反应形成 SiC 及其他含量可控的 Si 和其他相，接头厚度通过调整膏状含碳物及夹紧力来控制。接头厚度与成分显著影响接头的低温与高温性能。

1）NASA Lawis 的研究人员用反应成形法连接了各种 SiC 基陶瓷（RB – SiC 和烧结 SiC 等）和纤维增强的复合材料，包括各种尺寸和各种形状的陶瓷元件（如管状元件）等。

连接 RB – SiC 形成的反应接头，显微组织由基体 Si 相和粗细不均匀分布的 SiC 颗粒组成，接头中也存在一些残留的孔洞，连接烧结 SiC 时接头也由 Si 及 SiC 组成。反应成形方法连接 RB – SiC 和烧结 SiC 时，接头室温和 1 350℃下的高温强度（四点弯曲）分别为 150 MPa 和 170 MPa 左右，1 350℃下接头的强度基本没有下降而反而略有上升，RB – SiC 接头的强度与母材相当，接头断在陶瓷母材中；烧结 SiC 接头 23℃、1 200℃和 1 350℃下的四点弯曲平均强度分别为 275 ± 13 MPa、302 ± 17 MPa 和 297 ± 15 MPa（连接层厚度为 40 ~ 50 μm 时），接头断在连接层中。

2）Italy 的 P. Colombo 等用 Preceramic 聚合物作为连接材料，连接 RB – SiC，也可得到高温下组织与性能稳定的接头。

连接用的 Preceramic 聚合物是 SR350 硅酮树脂，在纯酒精中可以溶解到 4 300 g/L，将稠的浆料用刮刀均匀涂到被焊表面，试样叠在一起成为夹心结构，然后轴向加压 12.7 kPa 左右，在空气中加热到 200℃保温 2 h，以得到完全横向联结



的热固性硅酮树脂，并形成均匀厚度的聚合物层，这一阶段连接层厚度约在 18 ± 4 μm。然后试样在流动氩气中加热到 800 ~ 1 200℃保温 1 h，要求加热与冷却速度非常慢，约在 1℃/min，以减少因热膨胀系数的不匹配而产生的残余应力。在此温度下，聚合物向陶瓷转变，形成非晶态的共价键陶瓷（Si－O－C 非晶态陶瓷），此陶瓷作为无机黏结剂，使 RB－SiC 和连接材料之间直接形成化学键结合。硅酮树脂分解而成的非晶 Si－O－C 陶瓷的热膨胀系数为 3.14×10^{-6}/K，而母材 RB－SiC 陶瓷 20 ~ 1 200℃范围内的平均热膨胀系数为 4.5×10^{-6}/K。用这种方法连接的 RB－SiC 接头强度随连接温度而变，1 200℃连接时强度最高达到 220 MPa，连接温度不同，连接层厚度不同，温度升高厚度降低，800℃、1 000℃和 1 200℃连接时连接层厚度分别为 6.5 μm、4.5 μm 和 2.5 μm。

3）西班牙的 R.Torrecillas 等用锆石粉通过反应烧结连接氧化铝陶瓷和莫来石陶瓷。氧化铝陶瓷包括杂质含量少于 30×10^{-6}的高纯氧化铝和 98%的氧化铝两种，莫来石是杂质含量少于 0.3%、致密度为 97%的莫来石，连接材料是两种纯度不同、粒度在 1.2 μm 和 1.5 μm 的锆石粉。

锆石粉用 1%的散凝剂与乙二醇混合，将被焊陶瓷面磨至粗糙度达 1 μm 后，涂抹上锆石粉混合液，装配后 60℃干燥 24 h，最后在 1 600 ~ 1 680℃焙烧 1.5 h。

锆石与莫来石是稳定且固态相容的材料，在包晶温度（约 1 600℃）以上形成 ZrO_2 和液相，此液相与莫来石不平衡，莫来石开始溶入液相，使液相成分沿着相应的等温线移动，液相润湿莫来石基体。液相凝固形成玻璃相，玻璃相含量与组织与锆石含量有关，锆石含量高玻璃相量大，而且玻璃相促进 ZrO_2 晶粒的粗化。

用锆石粉连接的莫来石接头室温和 1 200℃的四点抗弯强度如表 4.13-15 所示。

表 4.13-15　用锆石粉反应烧结连接的莫来石接头的四点抗弯强度　MPa

温　度	室　温	1 200℃
莫来石材料	120 ± 10	133 ± 10
用 70%锆石连接的接头	32 ± 5	50 ± 5
用 40%锆石连接的接头	145 ± 5	160 ± 5

4　陶瓷基复合材料的连接方法

根据文献报道，连接陶瓷基复合材料的方法有：微波连接、过渡液相连接、反应成形法连接、原位或自蔓延高温合成方法连接、无压固相反应连接以及研究较多的用金属或玻璃钎料进行的钎焊。由于陶瓷基复合材料属于正在发展的新型材料，因此关于它们的连接技术的研究还开展得相对较少，所报道的结果基本上是一些初步的试验结果，还缺乏系统完整的研究。

4.1　钎焊

陶瓷基复合材料的钎焊与陶瓷钎焊基本相同：或是用玻璃钎料进行钎焊，或分两步先对陶瓷表面进行金属化后再用一般钎料进行钎焊，或用活性钎料进行直接钎焊。

用金属钎料钎焊陶瓷基复合材料时，钎料的选择与残余应力的降低是必须要考虑的问题。纤维增强的 CMC（陶瓷基复合材料）时与钎料间存在三种界面：钎焊纤维/钎料、基体/钎料以及纤维/基体，选择钎料时要同时考虑对基体陶瓷与加强相的作用。使用较多的钎料还是 Ag－Cu 共晶加上少量活性元素 Ti 的活性钎料，因为 AgCuTi 钎料适用于钎焊各种陶瓷材料，因此将它用于连接陶瓷纤维增强的陶瓷基复合材料也比较合适。

另外，由于多种材料的存在，CMC 与其他材料在高温连接时，界面附近将出现复杂的残余应力，不仅容易引起陶瓷基体的力学性能降低，而且还可能降低纤维和陶瓷基体之间的结合使破坏沿纤维与基体之间的界面发生。因此，降低残余应力也是提高接头强度所必须考虑的。

由于纤维增强的 CMC 会表现出各向异性，因此钎焊面与纤维排布面之间的关系也会影响接头的强度。纤维与钎焊面垂直时，接头的强度一般较高，这与残余应力的影响有关。

英国的D.G.Dixon用两步法钎焊SiC_f/堇青石复合材料与 Ti 合金和不锈钢。先用真空镀在复合材料表面镀一薄层 Ti，再用 50 μm 厚的Ag－Cu共晶钎料在流动氩气中 800℃下钎焊 10 min。为减少因复合材料与金属材料之间热膨胀系数不匹配而产生的应力，分别加入Cu、Ni、W以及SiC_f/Al金属基复合材料（MMC）作为中间层，Cu 和 Ni 是作为塑性金属中间层加入以降低残余应力的，W 和 MMC 则因为热膨胀系数与陶瓷基复合材料相近而被选择作为中间层。结果，CMC 与 Ti 合金接头中，以 Cu 作为中间层时，接头的抗剪强度最高，达到91.6 MPa，CMC与不锈钢的接头则以 MMC 材料作为中间层时强度最高，达到106.1 MPa。以 W 作中间层时，接头缺陷较多，在 CMC/钎料及中间层/钎料界面均可见裂纹。所有接头都在 CMC 中破坏。

日本的M.Nakamura等用AgCu2Ti钎料在真空中 850℃下钎焊C_f/Si_3N_4复合材料，钎焊时保温 10 min、加压 44 kPa，结果接头的四点弯曲平均强度为 107 MPa，最高达 159 MPa，比 Si_3N_4 陶瓷接头的强度低，认为复合材料接头强度低是由于 CMC 中存在大量裂纹缺陷以及 C_f/钎料间的强度低所致。M.Nakamura等还用AgCu2Ti钎料钎焊Si－Ti－C－O纤维组合增强的氧化物基复合材料，纤维与钎料之间发生了激烈的反应而在钎焊时出现沸腾现象，沸腾使界面出现未接合，影响了接头强度，850℃、保温 10 min、加压 44 kPa、真空条件下连接的接头四点弯曲平均强度达到 96 MPa。950℃连接时沸腾现象更严重，接头强度更低，只有 69 MPa。利用预金属化方法可以解决沸腾问题：将 0.1 mm 厚的 AgCu2Ti 钎料放到被焊 CMC 表面，真空中加热到 850℃、保温 10 min，使钎料与纤维反应形成的气泡可以逸出，经过预金属化后的 CMC 试样直接装配成连接试样，再经过真空连接时，纤缝处不再出现沸腾，接头强度可以提高到 259 MPa，而且强度的分散性减小。

意大利的 M.Salvo 等用活性元素 Si、Al 以及 ZBM（Zincborate)玻璃钎料钎焊用于热核反应的 CMC（主要包括 SiC_f/SiC、CFC 和 C_f/SiC）材料，钎焊温度在 1 000 ~ 1 420℃之间，Al 和 Si 均可以钎焊SiC_f/SiC和 CFC 材料形成致密的接头。Si 连接的接头抗剪强度要高于 Al 的接头（见表 4.13-16）。ZBM 玻璃钎料可用于连接SiC_f/SiC材料，但用于连接 CFC 时失败。

各种 CMC 钎焊的条件及接头性能综合于表 4.13-16 中。

总的来说，CMC 材料钎焊的研究还开展的比较少，数据不多，而且 CMC 钎焊接头的强度不如陶瓷接头高，可能与复合材料连接时多种材料存在时的界面与应力的复杂性有关，也与 CMC 材料本身的缺陷有关。

4.2　无压固相反应连接

M.Salvo 等为获得用于热核反应的耐高温接头，用高熔点活性金属 Ti 和 Zr 无压固相反应连接 CMC 材料，由于 CMC 材料的耐压性能差，因而不能加大的压力进行连接，主要靠



表 4.13-16　钎焊连接 CMC 材料的条件及接头性能

被连接材料	钎料	中间层	温度/℃	时间/min	压力	环境	界面反应产物	接头强度/MPa	破坏位置
SiC_f/SiC	Al		1 000	45			Al_4C_3	—	
SiC_f/SiC	Si		1 420	≤45				15 (S)	CMC
SiC_f/SiC	ZBM		1 200	45				15 (S)	CMC
C_f/SiC	Si		1 410	0			SiC	7 (S)	CMC
Si_3N_{4f}/堇青石－Ti合金	镀 Ti + 50 μm AgCu 共晶钎料	1 mm Ni	800	10		流动 Ar		40.6 (S)	CMC
Si_3N_{4f}/堇青石－Ti合金	镀 Ti + 50 μm AgCu 共晶钎料	1 mm Cu	800	10		流动 Ar		91.6 (S)	CMC
Si_3N_{4f}/堇青石－Ti合金	镀 Ti + 50 μm AgCu 共晶钎料	1 mm W	800	10		流动 Ar		8.0 (S)	CMC
Si_3N_{4f}/堇青石－Ti合金	镀 Ti + Al	1.5 mm MMC	800	10		流动 Ar		25.2 (S)	CMC
Si_3N_{4f}/堇青石－不锈钢	镀 Ti + 50 μm AgCu 共晶钎料	1 mm Ni	800	10		流动 Ar		57.5 (S)	CMC
Si_3N_{4f}/堇青石－不锈钢	镀 Ti + 50 μm AgCu 共晶钎料	1 mm Cu	800	10		流动 Ar		57.2 (S)	CMC
Si_3N_{4f}/堇青石－不锈钢	镀 Ti + 50 μm AgCu 共晶钎料	1 mm W	800	10		流动 Ar		8.4 (S)	CMC
Si_3N_{4f}/堇青石－不锈钢	镀 Ti + Al	1.5 mm MMC	800	10		流动 Ar		106.1 (S)	CMC
C_f/Si_3N_4	0.1 mm AgCu2Ti		850	10	44 kPa	真空	TiN	107 (B)	CMC/钎料界面
Si－Ti－C－O/氧化物	0.1 mm AgCu2Ti		850	10	44 kPa	真空		96 (B)	CMC/钎料界面
Si－Ti－C－O/氧化物	真空镀 AgCu2Ti		850	10	44 kPa	真空		211 (B)	CMC/钎料界面

注：强度值后括号中的字母代表不同的强度试验方法，S—剪切试验，B—四点弯曲试验。

Zr 和 Ti 在固态下与 C 或 SiC 反应，形成 Zr 或 Ti 的碳化物和硅化物将 CMC 连接起来。反应虽然可以形成致密的接头，但力学性能很差，基本不能承受载荷。因此，用 Ti 或 Zr 无压固相反应可以用于连接 SiC_f/SiC 复合材料形成不承受载荷但可以耐高温的致密接头。

4.3　微波连接

用微波加热方法固相连接陶瓷材料时，一般要加压。但是 CMC 材料的耐压性能差，因此在用微波加热连接时要解决不加压就可以实现连接的问题。Ki－Yong Lee 等通过在研磨后的被焊表面旋压覆盖一层 SiO_2 膜，经过 200℃、1 h 的干燥处理后，再用微波不加压进行连接，在1 075℃下实现了云母片晶增强的玻璃陶瓷复合材料的结合。

4.4　其他连接方法

W.J.Sherwood 等人用活性金属 Al、Ti、Si 粉加涂 C 的 Nicalon 短纤维和 SiC 含量高的 preceramic 聚合物混合形成浆料作连接材料连接 SiC 基复合材料。被焊 CMC 表面经过研磨后涂上混合浆料，用钢卡具装配成接头试样，放到惰性气体容器中以 1～2℃/min 的加热速度加热到 400℃，焙烧聚合物，之后去掉卡具放到炉中以 2～5℃/min 的加热速度加热到 1 000℃保温 1 h。连接后的试样再经过 5 次以上的浸润和热分解以强化接头。Sherwood 等还研究了混合浆料中纤维长短、浆料成分以及连接面形状等因素的影响，结果表明纤维较长（2～4 mm）时比 < 1.5 mm 的短纤维有利；浆料中加入细硅粉后可以改善接头的强度；燕尾槽形状的连接界面接头的强度较高。用这种方法连接的 SiC 基 CMC 接头的四点抗弯强度可达 75～110 MPa。

用这种与 CMC 制造方法相同或相似的方法连接 CMC 材料，可以得到性质与基体相近的接头、耐高温性能好，产生的热应力也较低。

编写：吴爱萍（清华大学）



第 14 章　金属间化合物的连接

1　金属间化合物的类型和特征

金属间化合物是两种金属以整数比或在接近整数比的一定范围内形成的化合物，它们背离传统的化合价概念，按照金属键结合（同时具有部分共价键和离子键性质），具有长程有序的超点阵结构，同时还具有金属光泽、导电性和导热性等，是一种高比强、低塑性/韧性合金。金属间化合物具有许多特殊的物理和化学性质，例如独特的电学性质、磁学性质、光学性质、声学性质、电子发射性质、催化性质、化学稳定性、热稳定性和高温强度等。金属间化合物的种类非常多，单就熔点而言，高于 1 500℃的就有数百种，是一种很有发展前景的新型高温结构材料。金属间化合物硬度很高，机械强度很大，而且在一定温度下随着温度升高，强度反而增加（如 Ni_3Al 和 Fe_3Al）。金属间化合物脆性是个严重问题，一般也具有低温脆性、高温超塑性的特点。

1.1　Ni－Al 系金属间化合物

Ni_3Al 的熔点为 1 395℃，它具有 $L1_2$ 型有序晶体结构。Ni_3Al 单晶在室温下呈脆性，多晶 Ni_3Al 以脆性晶间断裂模式失效。在铝的质量分数低于 25%的 Ni_3Al 合金中添加微量硼元素，可提高塑性和断裂强度。高温下，Ni_3Al 合金在含氧空气中易产生环境脆性。760℃空气中试验表明，该合金呈完全晶间断裂，添加 6%～10%（摩尔分数）的铬可以提高高温塑性 Ni_3Al 合金在 700℃的塑性可达 25%～40%，其疲劳性能优于镍基超合金，而其蠕变性能则与后者相当。在 Ni_3Al（Al 摩尔分数 24%）中添加 0.02%～0.05%的 B 后，室温伸长率由 0%提高到 40%～50%。表 4.14-1 中列出了五种美国研制的的 Ni_3Al 基合金，这些合金已在工业上进行了试用。如将 IC－396 用于柴油机的部件、IC－50 用于电热元件和航空、航天飞机的紧固件等。新研制的 IC6 高性能合金，其成分（质量分数,%）为：Ni（7.5～8.5）Al（12～14）Mo（0.02～0.06）B。该合金可在 1 050～1 100℃工作，比较适合用作航空发动机导向叶片等部件。

NiAl 的熔点为 1 600℃，呈体心立方有序 B_2 超点阵结构，具有高的抗氧化性能，是一种有应用前景的高温材料。影响其实用化的主要问题是室温塑性低，其次是在 500℃以上强度低。通过细化晶粒可以改善其塑性，室温下明显地改善性能的临界晶粒尺寸为 3 μm。在 NiAl 中加入 Fe，可以通过形成两相组织（Ni，Fe）（Fe，Al）和（Ni，Fe)$_3$（Fe，Ni）来提高强度和改善伸长率。此外，还可以通过机械合金化加入 Al_2O_3、Y_2O_3 和 ThO_2 弥散质点，改善其蠕变强度和高温强度，但室温塑性有所下降。

表 4.14-1　美国的五种 Ni_3Al 基结构材料

序号	材料名称	材料化学成分（摩尔分数）/%
1	IC－50	Ni－Al23%±0.5%－Hf（Zr）0.5%±0.3%－B0.1%±0.05%
2	IC－218	Ni－Al16.7%±0.3%－Cr8%－Zr0.5%±0.3%－B0.1%±0.05%
3	IC－328	Ni－Al17.0%±0.3%－Cr8%－Zr0.2%±0.1%－Ti0.3%±0.1%－B0.1%±0.05%
4	IC－396	Ni－Al16.1%±0.3%－Cr8%－Zr0.25%±0.15%－Mo1.7%±0.3%－B0.1%±0.07%
5	IC－405	Ni－Al18%±0.5%－Cr0.8%－Zr0.2%±0.1%－Fe12.2%±0.5%－B0.1%±0.05%－Ce0.000 5%

1.2　Ti－Al 系金属间化合物

Ti－Al 系金属间化合物主要有 α2－Ti_3Al、γ－TiAl 和 δ－$TiAl_3$，除塑性外，Ti－Al 系金属间化合物的各方面性能均高于 Ti 合金，表 4.14-2 列出了 TiAl 金属间化合物与其他高温结构材料的性能比较。

Ti_3Al（α2）为密排六方有序 DO_{19} 超点阵结构，800～850℃环境下具有良好的高温性能。γ－TiAl 具有很好的高温强度和抗蠕变性能外，密度小，弹性模量高和抗氧化性能好等特点，与镍基高温合金相比，可减轻质量 50%。γ 和 α_2（也称 Duplex）组织具有最高的拉伸塑性（2%～4%）及中等的强度水平但断裂韧性很低（K_{IC} = 10～16 MPa·m$^{1/2}$）。

1.3　Fe－Al 系金属间化合物

以 Fe_3Al 和 FeAl 为基的铁基铝化物具有优良的抗氧化性、耐腐蚀性、相对低的密度及低的材料成本。该系合金的主要不足是室温塑性较低，低温下易产生环境氢脆。

典型 Fe_3Al 基合金的成分及性能见表 4.14-3。添加铈和铬等合金元素对改善 Fe_3Al 基合金的室温强度和塑性有较大作用，而且添加微量铈还能改善合金的高温力学性能。添加铌、钼、钨和锆等合金元素对提高高温强度有显著作用，但铌和钼的加入都在一定程度上降低合金的室温塑性，其质量分数一般控制在 2.0%以下；添加钨也在一定程度上降低合金的室温塑性，但危害作用不如铌和钼大。

表 4.14-2　TiAl 系金属间化合物的特性

项目	Ti 合金	Ti_3Al	TiAl	Ni 基超合金
密度/g·cm^{-3}	4.5	4.15～4.7	3.76	8.3
熔点/℃	1 540	1 600	1 460	1 453
室温弹性模量/GPa	110～96	145～110	176	206
900℃弹性模量/GPa	70	110～90	140	140～150
屈服强度/MPa	380～1 150	700～990	400～630	865
抗拉强度/MPa	480～1 200	800～1 400	450～700	1 030
蠕变极限温度/℃	538	815	1 038	1 083
氧化极限温度/℃	593	649	1 038	1 093
最高使用温度/℃	600	650	1 040	1 090
室温伸长率/%	～20	2～5	1～3	3～5
工作温度下的伸长率/%	20～40	5～8	7～12	10～20
结构	B2/hcp	DO_{19}	$L1_0$	$L1_2$/fcc



表 4.14-3　典型 Fe_3Al 基合金的成分及性能

合金	成分/%	593℃ 207 MPa 持久性能		室温拉伸性能		600℃拉伸性能	
		时间/h	伸长率 δ/%	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%
FA-61	Fe-28 Al	2	34	393	4.3	345	33.4
Fa-122	Fe-28Al-5Cr-0.1Zr-0.05B	13	49	480	16.4	474	31.9
FA-91	Fe-28Al-2Mo-0.1Zr	208	55	698	5.7	567	20.9
FA-130	Fe-28Al-5Cr-0.5Nb-0.5Mo-0.1Zr-0.05B	202	61	554	12.6	527	31.2

FeAl 金属间化合物的室温脆性很高，断裂强度很低。环境氢脆是 FeAl 合金室温脆性的原因之一，添加锰、铬和镍等第三元素有助于消除氢脆，从而改善室温塑性；减小晶粒尺寸也可使 FeAl 合金的室温性能得到改善，例如对炉冷 Fe-Al 40 合金，在空气中及室温条件下，当晶粒尺寸为 220 μm 时，伸长率仅为 1%，而当晶粒尺寸减小到 15 μm 时，伸长率可达 3%。

2　Ni-Al 系金属间化合物的连接

2.1　Ni_3Al 合金的焊接

Ni_3Al 合金焊接时的主要问题是焊接裂纹。Fe、Hf 元素具有阻止热影响区热裂的作用，当合金中含有 10%Fe 和 5% Hf 时能大大改善焊接性能，调整 Ni_3Al 基合金中晶界元素 B 的含量，也有利于消除合金的堆焊热裂纹。

2.1.1　电子束焊接

采用能对热量进行精确控制的电子束焊接时，焊接速度较小时可以获得没有裂纹的焊接接头。随着焊接速度的增加，裂纹率显著增加。当焊接速度超过 10 mm/s 后，IC-25 合金出现裂纹。虽然加入 B 能改善晶界的结合，但当其含量超过一定的限量之后会导致合金热裂倾向增加，焊接性最好时的 B 含量在 0.02%左右。表 4.14-4 给出了两种材料的焊接速度与裂纹率的关系，当 w（B）由 IC-25 合金中的 0.05% 降到 IC-103 合金中的 0.02%时，裂纹完全消除，在 50.8 mm/s 焊接速度下焊接时，IC103 合金一直没有出现裂纹。

表 4.14-4　电子束焊接速度对裂纹倾向的影响

电子束焊接速度/$mm \cdot s^{-1}$	裂纹出现率/条·cm^{-1}	
	IC-103	IC-25
0	0	0
10	0	0.5
20	0	2.5
30	0	7
40	0	10
50	0	15
60	—	17

Ni_3Al 定向凝固高温合金电子束焊缝中存在焊接裂纹，裂纹有宏观和微观两种形式，宏观裂纹分为垂直焊缝和沿焊缝中心贯穿性开裂两种形式（肉眼可见），微观裂纹是指存在于焊缝结晶和熔合线附近的晶间裂纹。试验表明，未穿透焊缝易产生宏观裂纹，穿透焊缝比未穿透焊缝产生裂纹的倾向性小。高速焊接比低速焊接产生裂纹的倾向性小。低速焊接（如焊接速度为 0.3 m/min）时，电子束焊缝产生从焊缝中心处贯穿性开裂的宏观裂纹，高速焊接（焊接速度在 1.2 m/min以上）时，可以消除宏观裂纹，但不能消除微观裂纹。采用较高的加速电压时产生裂纹的倾向性小。表面焦点焊接比上、下焦点焊接产生裂纹的倾向性小。在焊缝中添加 0.1 mm 厚的纯 Ni 片可以消除焊缝中的裂纹，但会在焊缝中产生明显的空洞和疏松，焊缝的强度很低。在焊缝表面镀 0.005 mm 厚的 NiB 合金，焊后焊缝中的裂纹明显减少，但未能完全消除。

2.1.2　电弧焊接

采用电弧焊接 Ni_3Al 基合金时，焊材的选择尤为重要，选择合理的焊材可以直接弥补 Ni_3Al 基合金可焊性差的劣势，消除焊接裂纹。试验表明，Ni_3Al 母材不能用作焊接材料，焊接时容易出现缺陷。高温合金类 Ni818 是比较理想的 Ni_3Al 基合金焊接材料，它可以实现 Ni_3Al 构件的无裂纹焊接，其成分主要是在 Ni 基的基础上，添加 0.04C-15Cr-7.0Fe-15Mo-3.5W-1.0Mn-0.25V。为保证工艺稳定性，防止焊接裂纹的出现，焊前必须清除焊件表面的氧化皮、氧化膜、油污等，以避免外来非金属夹杂混入焊缝熔池。采用小电流低速焊接，控制热量向焊缝输入，加强散热，以防止焊接熔池过热及焊后组织粗大。此外，在保证良好焊接冶金的前提下，减小焊缝尺寸，将焊接热影响区的尺寸控制在最小，亦即需优先采用小坡口焊接。

采用 Ni818 焊材对 IC-218 铸件进行焊接时，焊接工艺参数见表 4.14-5。焊缝表面成形良好，经低倍化学腐蚀后从宏观上观察未发现表面裂纹，将焊缝解剖也未发现有焊接裂纹、内部气孔或夹渣等缺陷。力学性能分析可知，焊缝强度达到了 450 MPa，焊缝断口发生在熔合区，属韧性断裂。由于熔合区的合金化情况非常复杂，这就引起了焊缝的强度（熔合区的强度）比母材和焊材低。

表 4.14-5　Ni818 焊条焊接 IC-218 铸板的焊接工艺参数

母材	焊条直径 ϕ/mm	焊接电流/A	焊条预热/℃	坡口	焊前清理	焊缝处理	工艺特点	焊接方法
IC-218	ϕ2	130	200	45 度	机械打磨	750℃ 2h 退火	多层堆高	手工电弧焊

2.1.3　自蔓延高温合成焊接

自蔓延高温合成（SHS）技术比较适合于金属间化合物的连接，其特点是通过填充材料的内部化学反应发热来达到形成接头所需的高温以及由原位燃烧合成获得所需的接头组织。由于反应发生在连接区内，加热区集中，加热效率高，母材的热损伤小。而且，通过合理设计接头的反应组织，选取合理的原位合成材料的成分，可以获得与母材成分和性能相适应的接头。对铸造合金 IC-221M 成分（质量分数为 Ni81.14%、Al7.98%、Cr7.74、Zr1.75、B0.008%、Mo1.4%），连接用的填充材料为加微量 B 的富镍 Ni_3Al 粉，颗粒直径 < 45 μm；Al 粉的纯度为 98.5%（质量分数），颗粒直径为 10～15 μm，取 0.5 g 混合粉末冷压成 ϕ10 mm 的薄圆片。连接试验在 Gleeble-1500 热/力模拟试验机上进行。连接时的真空度大于 6.7×10^{-2} Pa。试验结果表明：在 50 MPa 的压力下，当加



热速率为 20℃/s，连接温度为 1 100℃，保温时间为 30 min 时，成功地实现了 Ni_3Al 的连接，获得了单相的 Ni_3Al 等轴晶焊缝组织。将保温时间延长为 60 min 时，焊缝晶粒尺寸有所长大。这两种情况下所得接头的显微硬度分布见表 4.14-6。

表 4.14-6　IC－221M 合金的 SHS 焊接接头显微硬度 HV0.2 分布

距离/mm	SHS 工艺规范	
	1 100℃/30 min	1 100℃/60 min
-1.00	400	380
-0.75	360	375
-0.50	375	360
-0.25	360	375
0（焊缝中心）	400	380
0.25	350	375
0.50	375	360
0.75	360	375
1.00	400	380

2.2　NiAl 合金的连接

2.2.1　液相扩散连接

NiAl 合金熔化焊接时，容易在表面形成连续的 Al_2O_3 保护层而使其焊接性变得很差，最常用的连接方法是瞬时液相扩散连接（TLP）和钎焊。铸造的 NiAl（Ni－Al48）和工业纯 Ni 液相扩散钎焊时，采用 51 μm 厚的 BNi－3 非晶态钎料箔，其成分为 Ni－Si4.5%－B3.2%（摩尔分数）。钎料的固相线温度 984℃，液相线温度 1 054℃，钎焊温度选取 1 065℃。加热到 1 065℃后，钎料熔化形成液相，当保温时间为 0 时，基体尚未溶解，液相与固相之间基本没发生扩散。此时接头中的组织全部由共晶组成。随着保温时间的增加，基体 NiAl 开始不断地向液相中溶解，使原来不含 Al 的 Ni－Si－B 共晶液体中开始含 Al，保温 5 min 后，NiAl/Ni－Si－B/Ni 接头中平均含 2at%（摩尔分数）的 Al。在界面附近的 Ni 基体内由于 B 的扩散形成了一个硼化物区，其宽度相当于 B 在 Ni 基体中的扩散深度。此外，在界附近的 NiAl 中由于 Al 向液相扩散而形成一个贫 Al 区。

对于国产的 IC6 合金，液相扩散连接时，中间层成分在母材的基础上进行了调整，将母材中的 Al 去掉，为提高抗氧化性加入了 7%左右的 Cr，还添加了 3.5%～4.5%B，做成 0.1 mm 的粉末。扩散连接温度为 1 260℃，等温凝固及成分均匀化时间为 36 h，所得到的接头在 980℃、100 MPa 拉力的作用下，持久时间可以达到 100 h。

该方法的典型应用是美国 GE 公司正在开展的 NiAl 单晶对开叶片的研制，其制造过程如图 4.14-1 所示，先铸造实心叶片，用电火花线切割将叶片切成两半，然后加工叶片内部的空腔结构，最后一道工序是将两半叶片焊在一起。采用的焊接方法是瞬时液相扩散连接，可获得与 NiAl 单晶力学性能相当的接头。

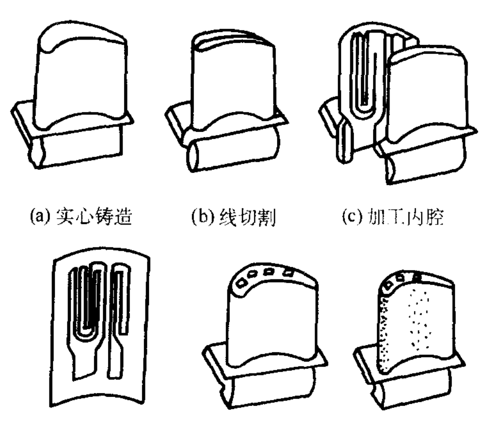


图 4.14-1　NiAl 单晶合金叶片的制造过程

2.2.2　NiAl 的自蔓延高温合成焊接

采用加压同步燃烧合成的方法也可以连接 NiAl 合金，为获得满意的接头组织和性能，需要对燃烧反应所能达到的温度进行控制。为了降低燃烧温度，可在 Ni 粉和 Al 粉的混合物中加入一定数量的 Al_2O_3 或已合成的 NiAl 粉末。表 4.14-7 是 Al_2O_3 的含量对燃烧温度的影响，可以看出，Al_2O_3 含量达到 12%时，燃烧温度可以降到 2 000℃。在连接 NiAl 金属间化合物的实验中采用了两种反应混合粉末，一种是在 Ni 和 Al 的粉末中加入 Al_2O_3 粉末 2.8%（质量分数），另一种是在 Ni 和 Al 的粉末中加入 NiAl 粉末 10%（质量分数）。这些反应物的粉末混合均匀后压成 12.7 mm 直径、约 5 mm 高的片，放在 110℃的烘箱内干燥 1 h。母材是含有 Al_2O_3 2.8%（质量分数）强化相的 NiAl 金属间化合物。将混合粉末的压片放在被连接的试件接头内，通过石墨夹具加压，所用连接压力为 24.8 MPa，在 W 丝炉内以 7.5℃/s 的升温速度加热到点燃温度（约 800℃）后，进行燃烧合成连接。接头组织分析可知，加 2.8% Al_2O_3 的接头中 Al_2O_3 均匀弥散分布，类似于母材，没有明显的气孔，但加入 at10% NiAl 的接头中出现大量气孔。其原因与连接时的燃烧温度有关，成分为 NiAl/2.8%（摩尔分数）Al_2O_3 混合粉末的燃烧温度为 1 827℃；而 NiAl－10%（摩尔分数）NiAl 的燃烧温度为 2 077℃。NiAl 的熔点为 1 638℃，因此在用 NiAl－10%（摩尔分数）NiAl 混合粉末连接时，液态 NiAl 大量过热，导致凝固缩孔以及 Al 蒸发产生的气孔。

表 4.14-7　Al_2O_3 加入量（质量分数）对 Ni＋Al 粉燃烧温度的影响

$w(Al_2O_3)$ /%	燃烧温度/K
0	2 600
2	2 100
4	2 000
6	2 050
8	2 100
10	2 100
12	2 000

3　Ti-Al 系金属间化合物的连接

3.1　Ti_3Al 合金的连接

Ti_3Al（α_2）合金与 Ni_3Al 合金不同，焊接时无热裂纹问题。从对不同合金热裂纹倾向的评定结果看，Ti_3Al 合金产生裂纹的临界应力为 240～260 MPa，明显高于 Ni_3Al 合金（80～200 MPa），熔化焊接 Ti_3Al 合金时的主要问题是常温下塑性不足而引起的固态裂纹和接头脆化。

3.1.1　Ti_3Al 的熔化焊接

熔化焊接时，在焊接热循环的作用下往往破坏了 Ti_3Al

的两相组织状态，室温下的 $\alpha_2+\beta$ 组织，加热到高温时进入β区，但由于高温冷却时β的分解非常缓慢，在快冷时来不及进行转变，在常规的电弧焊条件下，会产生脆硬的 α_2 马氏体（用 α'_2 表示），这种细针状 α_2 组织的塑性几乎为零。从表4.14-8可知，在相同的冷却速度下，合金元素含量越多，Ti_3Al 的硬度越大，说明形成脆性马氏体的量也越多。为获得理想的 $\alpha_2+\beta$ 组织，需要非常缓慢的冷却速度，如3 mm厚的板要求预热高达600℃，冷却速度需要低于25℃/s或通过焊后特殊的热处理。

表4.14-8 冷却速度对两种 Ti_3Al 合金硬度（HK）的影响

1 200℃到800℃的冷却速度/s^{-1}	0.1	1	10	100	1 000
Ti－Al26－Nb11	—	260	275	500	320
Ti－Al26.1－Nb9.61－V2.9－Mo0.9	300	360	450	330	—

电子束焊接 Ti_3Al 合金时，焊接速度对接头组织影响很大，低焊接速度（21 mm/s）时，由于热输入量高（370 J/mm），熔池和焊缝的冷却速度低，焊缝中的组织主要为针状 α_2，此时对应的硬度最高。当焊接速度为12.5 mm/s、热输入为96 J/mm时，冷却速度基本可以抑制β向针状 α_2 的转变，主要组织为亚稳态的β（B2）相，此时焊缝硬度有所降低。当焊接速度为25 mm/s，热输入为67 J/mm时，焊缝组织类似于12.5 mm/s焊接速度时的焊缝，主要为亚稳态β（B2）组织。热影响区的显微组织与距熔合线的距离有关，HAZ中的显微组织变化是由熔合线附近的针状 α_2 到远处的 $\alpha_2+\beta$ 组织。焊接接头显微硬度分布曲线表明焊缝和热影响区的硬度大大高于母材。而且，随着焊接速度的增加，使冷却速度增加，焊缝和热影响区内针状的 α_2 减少，从而降低了焊缝和热影响区的硬度，同时焊缝和热影响区变窄。

在焊接电流90 A、焊接电压10～11 V和4.2 mm/s焊接速度的条件下，用GTAW焊接Ti－14Al－21Nb时，焊缝和HAZ中的组织为细针状的 α_2，此时熔池中测得的冷却速度为65℃/s。当用无填充材料的GTAW焊接Ti－14Al－21Nb薄板时，在焊缝弧坑附近由于脆性组织的缺口敏感性产生了固态裂纹，该类裂纹分布于整条焊缝。

用激光焊接Ti－26Al－10Nb－3V－1Mo（摩尔分数）时，焊缝和热影响区主要为 α_2 相马氏体和残留的β相。在用激光焊和GTAW焊Ti－Al26－Nb11（摩尔分数）合金时，得到了类似的结果，甚至在用不需熔化的直线摩擦焊焊接Ti－Al26－Nb11时也会形成马氏体 α_2 相。

3.1.2 Ti_3Al 的扩散连接

图4.14-2是连接温度为990℃、12 MPa条件下连接时间对 Ti_3Al 接头抗剪强度的影响。随着连接时间从15 min提高到30 min，接头强度迅速提高，当连接时间超过30 min之后，接头强度上升的速度变慢。当连接时间为70 min时，接头的强度接近于母材，但连接时间继续增加时，由于晶粒的粗化和长大，接头的强度反而降低。图4.14-3显示出焊接压力9 MPa、连接时间30 min条件下，连接温度对接头抗剪强度的影响。在800～840℃的温度范围内，接头的强度较低且变化缓慢，连接温度超过840℃时，接头强度迅速提高，在940℃时达到751 MPa。

Ti_3Al 合金的扩散连接温度范围通常在1 000℃左右，所需的连接时间视温度而定。图4.14-4是温度与连接时间的关系曲线，从图中可以看出，在压力不变的情况下，随着温度的升高可适当减少扩散连接时间。图4.14-5是 Ti_3Al 扩散连接压力和时间的关系曲线，其连接条件为 $T=980$℃。图中曲线的右上方为完全焊合区，左下方区间内的连接规范不能获得完全焊合的接头。由图中曲线可以看出提高扩散连接压力能显著缩短扩散连接时间，只要压力选的很高，扩散时间可以很短，但压力太大容易对扩散连接带来许多不利影响，因此在实际中一般不采用这种连接规范。

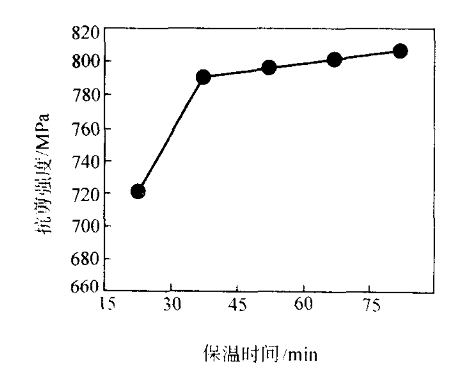


图4.14-2 扩散连接时间对 Ti_3Al 接头抗剪强度的影响

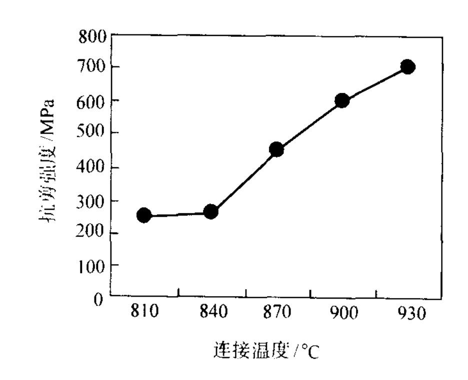


图4.14-3 扩散连接温度对 Ti_3Al 接头抗剪强度的影响

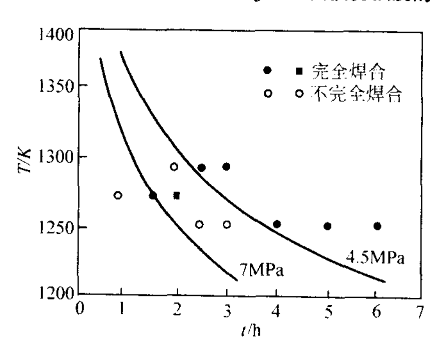


图4.14-4 Ti_3Al 扩散连接时间与温度的关系

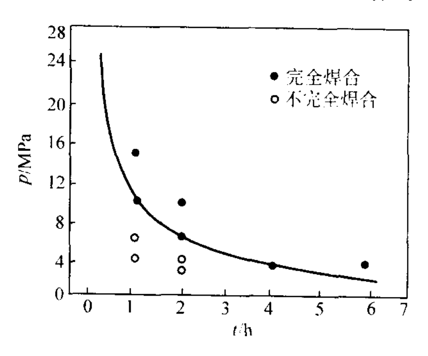


图4.14-5 Ti_3Al 扩散连接时间与压力的关系

3.2 TiAl合金的连接

3.2.1 TiAl同种材料的连接

TiAl金属间化合物可以采用氩弧焊、电子束焊、钎焊、扩散连接、自蔓延高温合成反应等方法进行连接。TiAl金属



间化合物熔焊存在的主要问题是焊接热裂倾向严重和接头力学性能低。

(1) TiAl 的电子束焊接

用电子束焊接 TiAl 合金时冷却速度对焊接裂纹敏感性影响很大。对 TiB_2 颗粒强化的 Ti－Al48%（摩尔分数）合金（含强化相 TiB_2 的体积分数为 6.5%），焊接时所用的工艺参数和相应的 HAZ 冷却速度见表 4.14-9，冷却速对裂纹倾向如表 4.14-10 所示。当 HAZ 冷却速度低于 300℃/s 时，裂纹敏感性随冷却速度的增加呈直线增加，从这类裂纹的断口形貌来看，没有热裂纹的迹象，这种裂纹属固态裂纹。在冷却速度约 100℃/s 的接头金相照片上也没有观察到裂纹。由此可见，当焊接参数选择合适时，用电子束焊接 TiAl 合金是可以获得无裂纹的接头。冷却速度是影响裂纹的主要因素。冷却速度又主要取决于焊接速度和预热温度。试验结果表明，当焊接速度为 6 mm/s 时，防止裂纹产生所必需的预热温度为 250℃。

表 4.14-9　电子束焊时所用的焊接参数及 HAZ 冷却速度

焊速 /mm·s⁻¹	加速电压 /kV	电子束流 /mA	预热温度 /℃	冷却速度 /K·s⁻¹
2	150	2.2	27	90
6	150	2.5	27	650
12	150	4.0	27	1 015
24	150	6.0	27	1 800
2	150	2.2	300	35
6	150	2.5	335	200
6	150	2.5	170	400
12	150	4.0	335	310
6	100	2.0	470	325
12	150	3.5	27	1 320

表 4.14-10　裂纹出现率与热影响区平均冷却速度（由 1400℃到 800℃）的关系

冷却速度/K·s⁻¹	0	300	700	1 000	1 800	2 700
裂纹出现率/条·mm⁻¹	0	0	0.14	0.23	0.45	0.57

(2) TiAl 的扩散连接

① 直接扩散连接　TiAl 金属间化合物扩散连接接头的性能主要受工艺参数和显微组织的影响。表 4.14-11 给出了直接扩散连接的工艺规范参数和接头强度。在 Ti－48Al（质量分数）双相 TiAl 基铸造合金的扩散连接过程中，随着连接温度、时间和压力的增加，连接接头的抗拉强度逐渐增加。在 1 200℃、3.8 ks 和 15 MPa 压力的条件下，得到了没有界面微观空洞及界面氧化的连接接头，接头室温抗拉强度达到 225 MPa，断裂于基体。高温拉伸试验表明（图 4.14-6），接头在 800℃和 900℃高温下的抗拉强度有所下降，强度值在 180 MPa 左右，比母材降低约 40 MPa。接合界面的显微组织对连接性能的影响也很大。

一般情况下，扩散连接接头经过真空热处理后，晶粒发生长大现象。例如，在 1 200℃、33.84 ks、10 MPa 条件下进行 TiAl 的扩散连接，然后将接头在 1 300℃、7.2 ks 和 1.3 MPa条件下进行真空热处理。金相组织观察可知，再结晶晶粒的直径由焊态的 65 μm 增加到约 130 μm。此时接头在 1 000℃的抗拉强度为 210 MPa，断裂在母材。

② 具有中间层的扩散连接　为了提高 TiAl 扩散连接接头的强度和韧性，有时采用加入中间过渡层的方法进行连接。中间过渡层的化学成分、添加形式及厚度等均对接头性能有较大的影响，需要严格选择。中间层应具有良好的塑性，以保证连接时变形容易，不应与母材发生不良反应，防止产生脆性相。中间层可以是纯金属，也可以是含有活化扩散元素或含有降低熔点元素的合金。表 4.14-12 是扩散连接时常用的中间层及其连接规范参数。从表中可知，采用中间层可以使 TiAl 在相对低的温度和压力下进行。此外，采用较低熔点的 Ti－15Cu－15Ni 作中间层，对 Ti－48Al－2Cr－2Nb 进行了过渡液相连接，可以很好地改善表面接触，提高了连接接头的性能。

表 4.14-11　TiAl 扩散连接的工艺参数、反应产物及接头强度

试件组配	温度/℃	时间/ks	压力/MPa	气氛	反应产物	接头强度/MPa
Ti－52Al/Ti－52Al	1 000	3.6	10	Vac	γ, $\gamma+\alpha_2$	—
Ti－48Al－2Cr－2Nb/Ti－48Al－2Cr－2Nb	1 000	3.6	10	Vac	α_2	—
Ti－48Al/Ti－48Al	1 000	2.16	10	Ar	TiO_2, Al_2TiO_5, γ	—
Ti－48Al/Ti－48Al	1 200	3.8	15	Ar	$\gamma+\alpha_2$	225
Ti－47Al/Ti－47Al	1 100	3.6	30	Ar	γ, $\gamma+\alpha_2$	400
Ti－47Al－2Cr/Ti－47Al－2Cr	1 250	3.6	30	Vac	α_2/γ	530
Ti－48Al－2Mn－Nb/Ti－48Al－2Mn－2Nb	1 200～1 350	0.9～2.7	15	Vac	γ, α_2	250

表 4.14-12　TiAl 扩散连接用中间层及工艺参数

试件组配	温度/℃	时间/ks	压力/MPa	气氛/mPa	反应产物	接头强度/MPa
Ti－52Al/V/Ti－52Al	1 000	1.8	15	Vac	Al_3V	200
Ti－48Al－2Cr－2Nb/Ti－15Cu－15Ni/Ti－48Al－2Cr－2Nb	1 150	0.03～0.12	—	Vac	$\beta Ti+\alpha_2$	—
Ti－52Al/Al/Ti－52Al	900	3.84	10～30	26	$TiAl_3$, $TiAl_2$	220

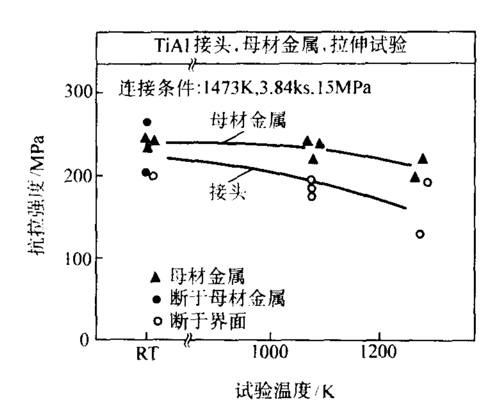


图 4.14-6 不同试验温度下 TiAl 接头和母材的抗拉强度
（连接条件：1 200℃、3.84 ks、15 MPa 和 26 mPa 真空度）

③ TiAl 的超塑性扩散连接 利用 TiAl 金属间化合物的超塑性进行扩散连接，可以大大降低扩散连接所需要的温度和时间。对 Ti－47Al－Cr－Mn－Nb－Si－B 合金，在 923～1 100℃、20～40 MPa 及真空度 4.5×10^{-5} torr 条件下进行了扩散连接，在连接温度 1 100℃下获得了断裂于基体的接头。试验结果可知，TiAl 金属间化合物晶粒尺寸在 0.4 μm 以下、连接温度 880℃、变形率为 10%时，才能实现 TiAl 的超塑性扩散连接。

(3) TiAl 的钎焊

采用红外钎焊、真空钎焊等方法都可以实现 TiAl 的可靠连接，红外钎焊时，采用氩气保护，钎料为 Ti－15Cu－15Ni（质量分数），熔点 932℃，连接温度 1 100～1 200℃。组织分析可知，连接界面由 γ－TiAl、α＋β 双相区、高 Al 的 α 相区、α_2－Ti_3Al、β－Ti 和残留的钎料凝固区组成。

采用电阻加热的高真空炉中钎焊时，可以选择多种钎料，表 4.14-13 是 5 种钎料的成分和固液相温度，钎焊温度为 960～1 250℃，钎焊时间为 1～15 min。

表 4.14-13 五种钎焊材料的成分和固液线温度

钎 料	成分（质量分数）/%	厚度/μm	固相线温度/℃	液相线温度/℃	沸点/℃
TiCuNi	Ti－15Cu－15Ni	100	910	960	1 000～1 050
ABA Cu	Cu－3Si－2.25Ti－2Al	100	950	1 024	1 025～1 050
ABA Au	Au－3Ni－0.6Ti	100	1 003	1 030	1 030～1 100
Nicrobrag 30	Ni－20Cr－10Si	50	1 079	1 135	1 149～1 204
288 合金	Pb－40Ni	250	1 237	1 237	1 250

采用 100 μm 厚的 TiCuNi 钎焊时，接头宽度一致，而填充金属与基体材料的界面则是由富铝的 Ti、Al 和被镍和铜合金化的 TiAl 所组成。接头的平均抗剪强度为 398 MPa，最高抗剪强度达到 420 MPa。但是，钎焊之后经 880℃、120 min 热处理，接头强度的平均值为 317 MPa，最高剪切强度值分别达到 484 MPa 和 442 MPa。试验证明，延长钎焊时间对接头抗剪强度有负面影响，其平均剪切强度只有 295 MPa。

用 ABA Cu 为填充金属进行钎焊时，接头的宽度尺寸较大，是原始填充金属厚度（100 μm）的 2～3 倍。界面反应区是由富铝的 TiCuAl 和 $TiCu_2Al$ 组成，析出相普遍存在于接头的中心线附近，最硬的区域为接头中部的析出相。钎焊工艺参数的选择很重要，1 030℃、1 min 的钎焊接头的平均抗剪强度达到 214 MPa。但是，如果将钎焊时间延长到 3 min，或者将钎焊温度提高到 1 050℃，其平均抗剪强度显著下降。

填充金属为 ABA Au 的钎焊接头的典型显微组织是在 Au－TiAl 合金组成的两相填充金属基体内分布着 Al_3Ni_2 岛状物，由于钎料对 TiAl 的润湿性很差，很难达到可靠连接的目的。钎焊接头中存在一些结构缺陷，故其平均抗剪强度还不到 50 MPa。

在 1 180℃、15 min 条件下采用 Iicrobrag 30 为填充金属进行钎焊，形成了具有正常组织和均匀宽度的接头，接头中部含有针状析出物，它分布在由镍硅化合物和镍铝化合物组成的基体中。EDX 分析证明，该析出物是铬碳化合物，并且含有足够量的碳。接头中心部分的显微硬度比基材显微硬度高 4～5 倍，其组织非常坚硬但很脆，导致最佳平均剪切强度数值仅为 141 MPa。可以采用 1 050℃、120 min 的热处理来改善接头性能。

以 Pd－40Ni 为填充金属进行钎焊时，钎焊过程很难进行，在 1 250℃温度下，即使钎焊时间很短，也会出现基材的过度熔化，导致接头宽度极不均匀，钛和铝在熔融填充金属内的快速溶解产生了低熔点的化合物。

(4) TiAl 的摩擦焊接

对 Ti－13.5Al－21.5Nb（质量分数）的摩擦焊表明，摩擦焊过程中，界面处的峰值温度已高于 β 相转变温度。由于较快的连接冷却速度，连接界面组织为极细的 β 相和其相应的转变产物马氏体组织。弯曲实验表明，这种接头组织的延性很低。用近等原子比的 Ti－33.8Al（质量分数）进行了摩擦焊试验，结果表明，在最佳连接规范参数条件下断裂发生在母材，抗拉强度达 539 MPa。断面组织分析表明，界面区由微细再结晶区域、纤维状组织和塑性流动层区域构成。通过降低摩擦应力，重新控制成分的热处理，可以获得重复性好和可靠的 TiAl 摩擦焊件。

3.2.2 TiAl 金属间化合物与其他材料连接技术

(1) TiAl 与陶瓷的连接

将 Ti－50%Al（摩尔分数）的 Ti－Al 粉末轧制成箔状，与 SiC 纤维进行热等静压连接，在 1 250℃、2 h 和 200 MPa 的连接条件下，SiC 纤维与Ti－Al 之间形成了 TiC 层、Ti_3Al（C）层、Ti_2Al（C）层和 Ti_5Si_3（C）层（表 4.14-14）。对 SiC 纤维与 Ti－48Al－2Cr（摩尔分数）锻造板材进行了扩散连接，连接参数为度 1 000℃、时间 2 h、压力 75 MPa，由于连接温度较低，SiC 纤维与 TiAl 板材并未发生反应。但接头在 1 250℃、2 h 的热处理后，界面反应的结果与前述的 SiC 纤维与 Ti－Al 粉末轧箔的反应结果是相似的。Al_2O_3 纤维与 Ti－Al 粉末轧制的箔材之间虽未发生显著的反应，但界面处也形成了一个极薄的高含氧量的反应层。

Ti 合金/TiAl/Al_2O_3 陶瓷三层结构的真空扩散连接时［Ti 合金为 TC4，TiAl 基复合材料的强化相为 TiB_2，基体为具有 $\gamma+\alpha_2$ 全层片组织的 Ti－48%Al（摩尔分数）］，三层结构都获得良好连接的规范参数组配为 1 300℃、1 h（或 1 250℃、10 h，或1 200℃、100 h）。采用 1 250℃、10 h 条件扩散连接时，在 TiAl 基复合材料/Al_2O_3 陶瓷的界面处发生了瞬时熔化现象，造成了接头中残余内应力的形成，从而使接头在界面处发生破坏。



4

表 4.14-14　TiAl 扩散连接的工艺参数、反应产物及接头强度

试件组配	温度/℃	时间/ks	压力/MPa	气氛/mPa	反应产物	接头强度/MPa
Ti - 50Al/SiC	1 250	2	200	Ar	TiC, $Ti_3Al(C)$, $Ti_2Al(C)$, $Ti_5Si_3(C)$	—
Ti - 50Al/Al_2O_3	1 250	2	200	Ar	富氧化合物	—
Ti - 48Al - 2Cr/SiC	1 000	2	75	Vac	无	—
Ti - 6Al - 4V/XDTi B2/Ti - 48Al/ Al_2O_3	1100	100	—	0.01	α，$\gamma+\alpha_2$，Ti - B 化合物，未知化合物	—

（2）TiAl 与钢的连接

利用感应钎焊的方法，用银基钎料及钛基钎料作中间层，对 Ti - 33.5Al - 1.0Nb - 0.5Cr - 0.5Si（质量分数）/AISI4340（Fe - 0.4C - 0.7Mn - 0.2Si - 1.8Ni - 0.8Cr - 0.2Mo）进行了扩散连接，结果表明，钛基钎料与钢的反应强于银基钎料与钢的反应，钛基钎料与钢之间产生了脆性的碳化层，而银基钎料与钢反应生成了固溶体。用银基钎料作中间层时的接头强度远远高于钛基钎料的钎焊接头，在室温下接头的拉伸强度可达 TiAl 金属间化合物基体的 60%，500℃高温下接头的拉伸强度可达 310 MPa（见表 4.14-15）。

表 4.14-15　TiAl 金属间化合物/AISI4340 接头的拉伸强度

拉伸强度	AISI4340		TiAl		银基钎料		钛基钎料		真空钎焊		感应钎焊	
	室温	500℃	室温	500℃	室温	500℃	室温	500℃	室温	500℃	室温	500℃
MPa	1 060	691	520	580	320	310	210	250	360	220	320	310

对含有合金元素 Fe、V、B 的金属间化合物 TiAl 与 SACM645 结构钢进行了扩散连接，连接温度为 900～1 100℃，连接时间 1 min～1 h，压力 10～20 MPa。扩散连接结果显示，常温拉伸试验中，所有试件都在连接界面破坏，接头拉伸强度与工艺参数之间存在一定关系（图 4.14-7，图 4.14-8）。在连接时间 1 h、连接压力 19.8 MPa 条件下，扩散连接温度有最佳值，当连接温度为 950℃（1 223 K）或 1 010℃（1 283 K）、连接压力 19.8 MPa 时，连接时间越短，接头拉伸强度越大。

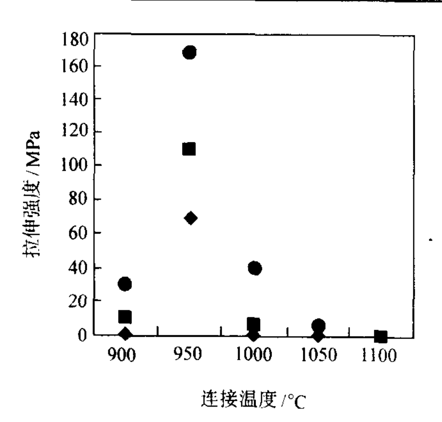


图 4.14-7　拉伸强度与连接温度关系
（$t=3.6$ ks，$p=19.8$ MPa）

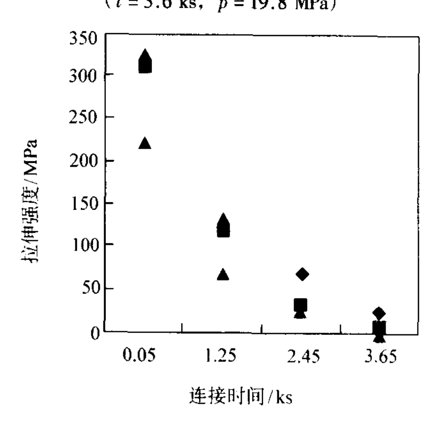


图 4.14-8　拉伸强度与连接时间关系
（$T=1\ 000$℃，$p=19.8$ MPa）

4　Fe-Al 系金属间化合物的连接

Fe_3Al 金属间化合物可采用电子束焊和钨极氩弧焊进行焊接，但 Fe_3Al 金属间化合物与钢的物理和化学性能差异很大，难以采用常规的熔焊方法进行焊接，只能采用真空扩散焊技术

对 Fe_3Al/Q235 扩散焊试样的金相观察表明，Fe_3Al 金属间化合物与 Q235 钢在界面处存在明显的扩散特征，界面结合状况良好。Fe_3Al 一侧的显微组织越过界面向 Q235 一侧连续地延展，扩散界面呈镶嵌状互相交错。在界面过渡区靠 Fe_3Al 一侧，柱状晶晶粒较粗大，显微组织大多为等轴晶。在 Q235 钢一侧，由于 Al 元素的扩散过渡，使界面过渡区靠 Q235 一侧的铁素体晶粒也较粗大，并且界面附近几乎全部为铁素体。成分分析可知，Fe_3Al/Q235 扩散过渡区主要由 Fe_3Al 相和 α - Fe（Al）固溶体构成，存在少量的 FeAl 相，但不存在含铝更高的 Fe - Al 脆性相。这种相组成对提高 Fe_3Al/Q235 扩散界面的韧性和抗裂纹能力是有利的。显微硬度测试结果表明，靠 Q235 钢一侧的显微硬度较低（300～380HM），而靠 Fe_3Al 一侧扩散过渡区的显微硬度明显增高刀 470～530HM，但与 Fe_3Al 基体显微硬度（HM≥500）相比仍偏低。

编写：何　鹏（哈尔滨工业大学）
冯吉才（哈尔滨工业大学）

23



第15章　复合材料的连接方法

1　复合材料的分类及特点

复合材料是将两种或两种以上不同性质的材料优化组合而成的多相固体材料，它是由基体与增强材料组成，基体一般为连续相，增强材料多为不连续相，也称增强相。用于增强的材料有长纤维、短纤维、晶须、颗粒等多种形式。复合材料最大的特点是具有优异的综合性能和可设计性，可以根据需要选择不同的基体和增强相，确定基体和增强相的比例、分布和复合形式。

1.1　复合材料的分类

复合材料的分类方法较多，目前主要是按基体材料类型、按增强相形态和按增强相材质进行分类。

按基体材料类型可以将复合材料分为金属基复合材料（铝基、钛基、镁基、金属间化合物基等）、无机非金属复合材料（陶瓷基、混凝土基和碳/碳基等）、有机复合材料（热塑性树脂基、热固性树脂基、橡胶基等）。按照增强相的形态，可以将复合材料分为具有各向异性的连续纤维增强复合材料（纤维排布具有方向性，每根长纤维的两个端点位于复合材料的边界）、具有各向同性的非连续增强复合材料（利用短纤维、颗粒、晶须等增强，增强相在基体中随机分布）。按照增强相的材质，可以将复合材料分为无机非金属增强复合材料、金属增强复合材料及有机纤维增强复合材料。

1.2　复合材料的特点

由于复合材料是由性质不同的材料，通过各种加工工艺组合而成，因此具有优异的综合性能。

1）高的比强度和比模量　比强度和比模量是指材料的强度、弹性模量与材料的密度之比。复合材料具有比其他材料高很多的比强度和比模量，表4.15-1是典型复合材料性能和金属性能的对比。比强度和比模量高的复合材料，在航空航天领域有广泛的应用，可大大减轻重量，提高刚性，减少燃料消耗。例如复合材料代替2024铝合金制造战斗机机身下垂尾，刚度增加50%，寿命提高约17倍，用于导弹发动机的制造，使部件的重量减轻40%、燃料消耗降低30%～50%，不仅提高了导弹的命中精度，也是提高导弹飞行速度和增大导弹射程的有效方法。

2）耐疲劳性能好　金属材料的疲劳破坏常常是没有明显预兆的突发性破坏，而纤维增强复合材料中纤维和基体间的界面能够有效地阻止疲劳裂纹的扩展，提高材料的断裂韧性。此外，复合材料中存在大量纤维，当材料过载时少数纤维发生断裂，载荷会重新分配到未破坏的纤维上，整个构件在短期内仍具有一定承载能力。

表4.15-1　典型材料的力学性能对比

	材　　料	密度/$g\cdot cm^{-3}$	弹性模量 E/GPa	强度 σ_b/MPa	比模量 /$GPa\cdot cm^3\cdot g^{-1}$	比强度 /$MPa\cdot cm^3\cdot g^{-1}$
复合材料	40% CF/尼龙66	1.34	22	246	16	184
	连续S－玻璃纤维/环氧树脂	1.99	60	1 750	30.2	879
	25% SiC_w/氧化铝陶瓷	3.7	390	900	105	—
	50% Al_2O_{3f}/Al合金	2.9	130	900	49	310
	20% SiC_w/6061Al	2.8	121	586	43	209
	20% Al_2O_{3p}/6061Al	2.9	97	372	33	128
	35% SiC_f/TC4钛合金	4.1	213	1 724	52	420
	碳化硅纤维/环氧	2.0	130	1 500	65	750
	芳纶/环氧	1.4	80	1 500	57	1 070
	石墨纤维/铝	2.2	231	800	105	360
金属	Q235钢	7.86	210	460	27	59
	30CrMnSi/调质钢	7.75	196	1 100	25	142
	纯铝	2.7	69	100	26	37
	6061Al	2.71	69	310	25	114
	α钛合金	4.42	123	850	28	195
	1Cr18Ni9Ti	7.75	184	539	23	68
	TC4（Ti－6Al－4V）	4.43	114	1 172	26	265

注：1. 表中所列铝合金为T6处理。所列纤维增强复合材料力学性能为纤维纵向力学性能。
2. 表中材料的百分含量均为质量分数。

3）线系数小，高温性能好　复合材料的增强相具有很小的热胀系数，可以保持构件的尺寸稳定。例如，含48%的碳纤维增强镁基复合材料的热膨胀系数为零，是人造卫星的重要结构材料。此外，增强相的耐热温度比金属材料高，使复合材料具有更高的高温强度和高温弹性模量，以及良好的抗蠕变性能（如图4.15-1所示）。



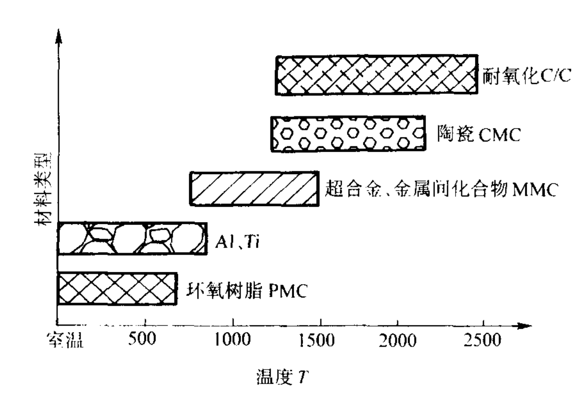


图 4.15-1　各种材料的耐热温度

4）具有良好的耐磨性和减振性　陶瓷材料具有优越的耐磨损性能，采用陶瓷颗粒、晶须进行增强的金属基复合材料也具有很好的耐磨性。例如，SiC/Al 复合材料的耐磨性能优于铸铁，已经在汽车发动机的制造中得到应用。利用复合材料制造的人造卫星，不仅减重 40%～75%，而且使有效载荷的在轨振动减轻 90%，提高了控制精度和照片的拍摄、传输精度，从而提高了卫星的整体性能。

1.3　复合材料的应用

复合材料的应用非常广泛，涉及到航空航天、汽车、交通、机械、化工、船舶等领域。表 4.15-2 列举出金属基复合材料的应用实例。

表 4.15-2　国外金属基复合材料开发应用实例

种类	材　　料	应　　用	特　　点	制造厂家
铝基复合材料	25%（体积分数）SiC 颗粒增强 6061 铝基复合材料	航空结构导槽、角材	代替 7075Al，密度下降 17%，弹性模量提高 65%	美国 DWA 特种复合材料公司
	17%（体积分数）SiC 颗粒增强 2014 铝基复合材料	飞机和导弹零用薄板	拉伸模量在 100 千兆帕以上	英国 BP 金属复合材料公司
	40%（体积分数）SiC 晶须增强 6061 铝基复合材料	三叉戟导弹制导元件	代替机加工铍元件，成本低、无毒	英国航天航空公司
	Al_2O_3 纤维增强铝基复合材料	汽车连杆	强度高，发动机性能好	日本日产公司
	15%（体积分数）TiC 颗粒增强 2219 铝基复合材料	汽车制动器卡钳、活塞	模量高	美国 MM－Amax 公司
镁基复合材料	SiC 颗粒增强镁基复合材料	螺旋桨、导弹尾翼	耐磨性好、弹性模量高	美国 DOW
钛基复合材料	SiC 纤维增强 Ti－6Al－4V 基复合材料	压气机圆盘、叶片	高温性能好	美国 Textron
铜基复合材料	SiC 增强的青铜基复合材料	推进器	效率高、音响小	美国海军

复合材料的应用推动了焊接技术的发展，1981 年美国航天飞机最早成功地采用了纤维增强铝基复合材料 B/Al 焊接结构制造中部机身珩架，其结构如图 4.15-2 所示，在 B/Al 管两端插入 Ti－6Al－4V 制成的套管，在 B/Al 复合化的同时完成 B/Al 管与 Ti－6Al－4V 套管之间的扩散连接，最后，将套管与 Ti－6Al－4V 钛合金构件进行电子束焊接，从而形成图中的复合材料构件。在航天飞机机体中部，共用了 242 根这种构件，与以前用铝合金相比，其总重量减轻了 145 kg（约为 44%），同时由于该材料导热性下降，在隔热方面比采用铝合金降低了要求。前苏联采用 Al－B 复合材料焊接技术制成了自行车架，如图 4.15-3 所示，该构件车身重 1.2 kg、前叉重 0.4 kg，车身管件之间通过钎焊连接。

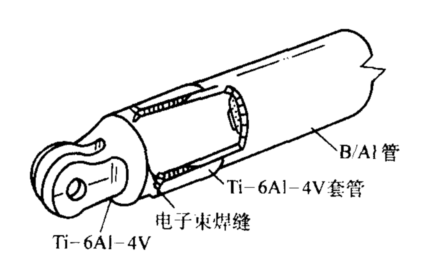


图 4.15-2　航天飞机中部复合材料机身珩架

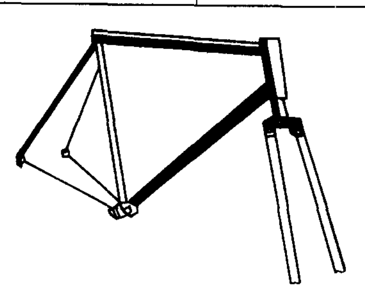


图 4.15-3　自行车复合材料珩架

2　金属基复合材料的连接

2.1　金属基复合材料的制备

金属基复合材料一般按增强体形式进行分类，可分为粒子分散强化型、纤维强化型及积层型等。金属基复合材料在制造过程中，也采用了扩散连接或热压接技术，图 4.15-4 是复合材料的类型、特性及制备方法。

2.2　金属基复合材料的连接

金属基复合材料很难采用电弧焊接的方法进行连接，TIG 焊、激光焊、钎焊、摩擦焊、电阻焊及扩散焊等方法均

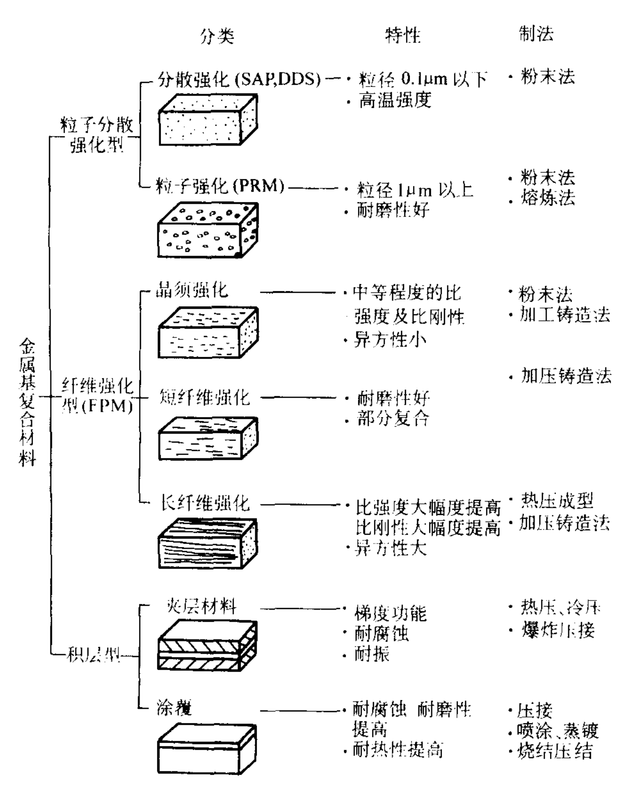


图 4.15-4　金属基复合材料的种类及特性

在一定程度上适合于金属基复合材料的连接，但与焊接单一金属相比存在较大的困难。主要原因是增强相与基体物理性能的巨大差异使焊接工艺参数难以控制，在焊接过程中，热和力的作用使得接头区域中增强相及其与基体之间良好的界面被破坏。虽然在一定的条件下，扩散焊、激光焊等方法显示出较高的适应性和较好的应用前景，但还局限在试验阶段，迄今为止，人们还没有找到行之有效的焊接方法应用于金属基复合材料实际结构的连接，其焊接性和焊接工艺研究是国内外普遍关注而又亟待解决的热点课题。

图 4.15-5 是金属基复合材料焊接的典型接头形式。对接接头是熔化焊接的主要接头形式，b、e、f 的接头形式在扩散连接中经常采用，除了对接以外的接头形式都适合于钎焊。当搭接面积达到一定程度时，接头强度会增加到与母材等强度。但是，b、c、d 形式的接头随着搭接长度的增加，会增加接头重量。为了提高承载能力，可以采用 e、f 中的斜口对接和台阶式对接。

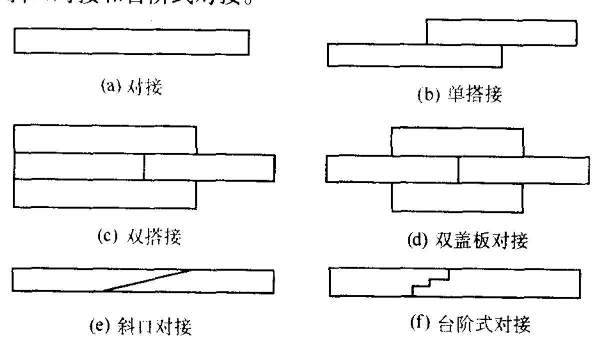


图 4.15-5　金属基复合材料的接头形式

2.2.1　电弧焊

（1）熔化焊接时的问题

1）增强相与基体的物理性能特别是熔点相差很大（例如铝基复合材料基体 Al 的熔点为 660℃左右，而通常的增强相 SiC、Al_2O_3 的熔点可达 2 000℃以上），这就决定了铝基复合材料的熔池将是液、固两相共存，使得熔池的黏度增大、流动性变差甚至难以形成熔池，接头中增强相不均匀分布，出现气孔、疏松、未熔合等缺陷，即使采用流动性很好的填充材料也很难收到良好的效果。

2）在高温下容易引起基体－增强相间的界面反应，生成脆性化合物，极大地降低接头性能，而且界面反应生成物在一定环境下变得极不稳定。例如，熔化的 Al 与 Si 颗粒发生反应（$Al + SiC \rightarrow Al_4C_3 + Si$），生成了 Al_4C_3 和块状的 Si，脆性相 Al_4C_3 呈针状或片状插入复合材料基体中，破坏了 SiC 与基体的结合界面，使焊缝变脆，而且 Al_4C_3 与 H_2O 在一定条件下易生成 C_2H_2，使焊缝在潮湿的环境下易被腐蚀。

以上原因严重制约着熔焊方法在金属基复合材料连接中的应用，近年来随着研究的深入，人们发现金属基复合材料熔焊时熔池的流动性与熔池的界面反应均与焊接热输入有关，并且二者表现为相互对立关系。当焊接热输入较大时熔池温度较高，熔池流动性提高，但此时界面反应剧烈；相反，当焊接热输入较小时熔池界面反应较小，但此时熔池的流动性差。因此不能单纯依靠增大或减小热输入来提高金属基复合材料接头的性能。

（2）TIG 焊

TIG（钨极氩弧焊）焊是最常用的焊接方法，可以对铝基、钛基、镁基复合材料进行焊接，所用的 TIG 焊设备应能够精确控制或调节输入热量，焊接工艺参数可参照基体材料的规范，并在试验的基础上进行适当调整。TIG 不加填充焊丝时，SiC 粒子上浮使熔池形成一层浮渣，因此焊接时一般都进行填丝，焊丝的选择应考虑改善熔池的流动性，可选含 Mg、Si 等成分的焊丝。例如 10% Al_2O_{3p}/6061Al 复合材料，可选 5356Al 作为填充材料。含硅量高的 4043、4045 和 4047 铝合金用作填充材料时，可以减轻铝和碳的反应，抑制 Al_4C_3 化合物的形成，常用于 15% SiC_w/6061Al 复合材料的焊接。

为了改善金属基复合材料的焊接性，对粉末冶金法制造的铝基复合材料，焊前进行真空去氢处理，可明显减少焊缝中气孔、裂纹等缺陷，显著提高接头质量。SiCp/LD_2 铝基复合材料 TIG 焊焊接工艺研究结果表明，采用填丝焊接，同时焊前经过 500℃、36 h 真空处理，焊缝中的气孔明显减少，接头的力学性能如表 4.15-3 所示。

表 4.15-3　SiCp/LD2 TIG 焊接头的抗拉强度

材　料	焊前处理状态	接头状态	强度/MPa
母　材		T6	303
采用 Al－Si 焊丝焊接的接头	真空去氢	焊态	201
	未真空去氢	焊态	131
采用 Al－Mg 焊丝焊接的接头	真空去氢	焊态	165
	未真空去氢	焊态	122

注：真空处理条件：500℃ × 36 h，真空度 133.322×10^{-4} Pa。

对于非连续增强 18% SiCw/6061Al 复合材料，厚度超过 3 mm时，应开 90°的坡口以及保留 1.5 mm 左右的根部钝边，焊接电流 140 ~ 160 A，焊接电压 12 ~ 14 V，焊丝选 4043Al，送丝速度 2.5 ~ 3.4 mm/s，氩气纯度 100%，氩气流量 5.8 ~ 7.0 L/min。该焊接规范下的接头强度可以达到 180 MPa。

对于较厚的板材，应开双面坡口，例如 6.4 mm 的 20% Al_2O_3/6061Al 复合材料焊接时，可单面开 60°的坡口（每侧 30°），并保留 1.6 mm 的根部钝边。采用交流电源焊接，焊接电流 325 A，焊接电压 22 V，送丝速度 23 mm/s，纯度 100% Ar 的流量为 16.5 L/min，焊丝材质为 5356 铝合金，直



径 2.38 mm。力学性能试验表明，接头的抗拉强度达到了 228 MPa。

采用 TIG 焊接 B/Al 复合材料时，通过在焊接过程中控制输入的焊接能量及填加富 Si 的焊丝，大大抑制焊接过程中发生的界面反应，减小 B 纤维在焊接过程中的破坏。例如，0.64 mm B/Al 复合材料（含 B50%）的 TIG 焊接时，焊接电流 20 A，电压 16.5 V，焊接速度 1.7 mm/s，焊丝成分为 4043 铝合金，直径 1.6 mm，100% 纯氩气保护。采用上述低热输入的工艺规范，焊缝成形良好，但焊缝中仍然生成了少量的 AlB_2 反应相。

对 SiC/Al 复合材料，可选钛合金作为填充材料，一方面改善焊接熔池的流动性，另一方面由于 Ti 与 C 的生成自由能低于 Al 与 C 的生成自由能，从而导致 Ti 优先与 SiC 增强相发生原位反应生成 TiC，这不仅大大减弱 Al_4C_3 有害反应物的生成，而且生成的 TiC 颗粒能够代替 SiC 颗粒有效地对焊缝进行增强，起到提高焊缝接头强度的效果。

钛基复合材料的 TIG 焊接应当在 Ar 气保护下进行。表 4.15-4 是钨（或碳）纤维增强钛基复合材料的接头强度。复合材料板厚 1.4 mm，采用交流焊接电源，焊接电流 60 A，电压 10 V，焊接速度 2.54 mm/s。焊接时熔池中液态的 Ti 和 W（或 C）发生剧烈的化学反应，但仍然可以得到满意的焊缝外观形貌和较高的接头强度。

表 4.15-4　纤维增强 W/Ti 复合材料 TIG 焊接头强度

W（体积分数）/%	试件类别	E/GPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%
0	母材	99	477	612	29.0
	对接	115	503	640	17.5
	薄板焊道	107	568	701	14.0
4.5	母材	150	568	705	15.8
	对接	117	558	700	11.7
	薄板焊道	140	734	894	4.5
9.8	母材	146	656	714	3.4
	薄板焊道	119	119	905	4.0

（3）MIG 焊

MIG 焊（熔化极氩气保护焊）的焊接效率高，可以实现单面焊双面成形控制，易于自动化焊接，常用于厚板的焊接。复合材料 MIG 焊接时，电弧稳定性与 TIG 焊相似，容易受到增强相的干扰，而且，熔池内产生激烈的化学反应。进行厚板的单面焊双面成形时，焊缝正面应开坡口，根部预留 1～2 mm 的间隙，背面增加开槽的垫板。焊接 SiC 或 Al_2O_3 增强的 6061 铝基复合材料时，可选用 5356 铝焊丝，焊接电源为直流反接。

对于厚度为 6.4 mm 的 20% SiCw/6061Al 板材，可开 75° 的坡口，根部间隙 2.38 mm，背面加开槽的铜垫板。焊接工艺参数为电流 130～140 A、电压 22～23 V、4.2～5.1 mm/s 的焊接速度、纯氩保护、焊丝直径 1.1 mm。对于大厚度板材或管材的焊接，可以采用多层焊接。例如，外径 320 mm、壁厚 19 mm 的 20% SiC_w/6061Al 管材，选择的焊接电流为 230～290 A，焊接电压 25～27 V，共焊 9 层。

厚度为 19 mm 的 20% Al_2O_{3p}/6061Al 板材，焊接时开 60° 坡口，钝边 3.2 mm，根部间隙 1.6 mm。焊接工艺规范为 305 A 和 26 V，焊丝直径 1.6 mm、材质为 5356 铝合金，纯氩气流量为 23.6 L/min。4 层焊道焊接时的速度不同，前两层的焊接速度分别为 6.4 mm/s 和 4.2 mm/s，后两层焊接速度均为 5.9 mm/s。焊接质量良好，其接头强度见表 4.15-5。

表 4.15-5　6061 铝基复合材料的 MIG 焊接头强度

母　材	形式	厚度	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ/%
6061Al T6	板，管		276	303	5
6061Al 焊态	板，管		131	207	11
20% SiCw/6061Al T6	管	19	130	252	6.6
20% SiCw/6061Al 焊态	管	19	106	214	6.1
20% SiCw/6061Al 焊态	板	6.4	150	237	4.5
20% Al_2O_{3p}/6061Al T6	板	19	189	283	3.9
20% Al_2O_{3p}/6061Al 焊态	板	19	132	228	6.6

2.2.2　激光焊

激光焊的热影响区很窄、熔池存在时间短、凝固速度快，熔池中结晶界面对增强相的推移作用小，有利于增强相在焊缝中均匀分布。但激光焊加热温度非常高（连续激光焊熔池的最高温度可达 2 473 K），焊接时界面反应剧烈。激光焊接 SiCp/Al 复合材料时，SiC 增强相对激光的吸收率比基体要高得多，高能量密度的激光焊使得 SiC 增强相优先吸热，温度迅速升高，再通过热传导加热 Al 基体，导致 Al_4C_3 反应物的生成。

采用合适的激光功率与焊接速度，可以抑制界面反应，得到外观成型良好，内部无气孔、裂纹等缺陷的焊接接头。提高熔池中 Si 的活度可以抑制基体与增强相的界面反应，所需的 Si 含量随温度不同而变化（图 4.15-6）。

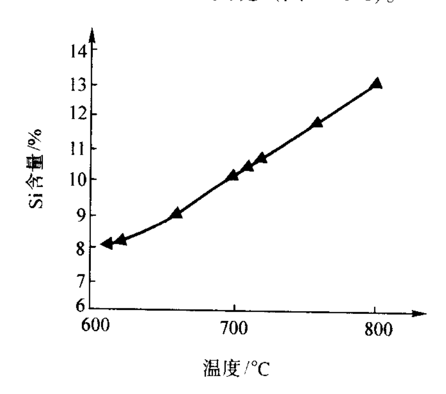


图 4.15-6　不同温度下抑制 Al_4C_3 生成所需要的 Si 含量

图 4.15-7 为激光焊接条件下焊缝和热影响区的典型组织照片，在焊缝区域有大量针状物存在，成分分析表明该物质为 Al_4C_3，是基体与增强相界面反应的产物。从组织照片可以发现，该反应物具有一定的方向性，均由焊缝向母材方向生长。图 4.15-8 为界面反应物 Al_4C_3 含量和焊缝抗拉强度随激光输出功率变化曲线，可以看出在不同激光焊接规范下，Al_4C_3 反应物始终存在，表明激光焊接 SiC_w/6061Al 复合材料时界面反应是不可避免的，同时随着激光输出功率的增大，Al_4C_3 含量逐渐增大，接头强度显著下降。透射电镜观察可知，在母材组织中，增强相 SiC 晶须与基体 Al 合金之间界面结合良好，通过界面可以实现载荷的有效传递；而在激光焊接条件下 SiC－Al 界面发生了明显的反应，基体与增强相间原始的良好界面遭到破坏，生成针状反应物插入基体，使焊缝变脆。在较低焊接规范时，增强相 SiC 晶须呈“锯齿”形，而随着激光输出功率的增大，焊缝中界面反应剧烈，增强相被消耗，反应生成了大量的 Al_4C_3，引起焊接接头性能的降低。

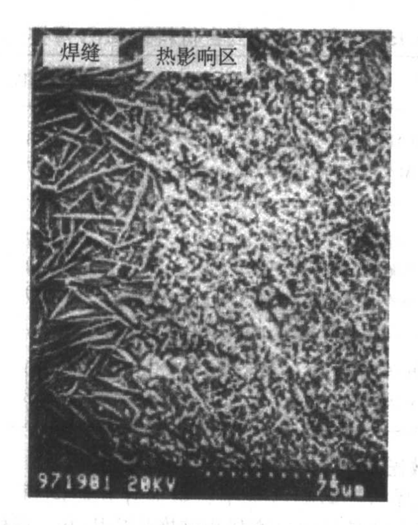


图 4.15-7 激光焊接时的焊缝和热影响区组织

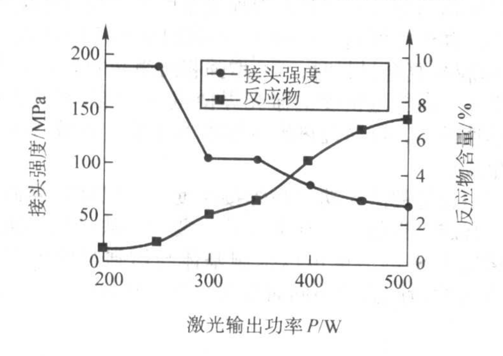


图 4.15-8 不同焊接规范下的焊缝反应物含量及接头强度

焊接 Al 基复合材料时脉冲激光焊较连续激光焊具有更大的优越性。这是由于脉冲激光只有在脉冲作用时加热熔池，而在脉冲间隔时间段内冷却熔池，这样就能够保证在熔透的前提下减小熔池的热输入量，减小熔池有害界面反应的影响。同时在一定的激光脉冲频率作用下，将引起熔池内能量的重新分布，使得熔池温度不至于过高，并且一定频率的激光脉冲将会对熔池产生扰动，使熔池流动性得到改善，有利于消除焊缝中的气孔、未熔合等缺陷。接头组织分析可知，采用较低激光脉冲频率（10 Hz 以下）焊接时，焊缝中存在较大尺寸的气孔，随着脉冲频率增大（20 Hz），气孔数量、尺寸明显减少，进一步增大脉冲频率（30 Hz），焊缝中气孔趋于消失，从而有利于接头质量的提高。焊接接头强度与脉冲频率的关系如图 4.15-9 所示，随脉冲频率升高，接头强度增大。

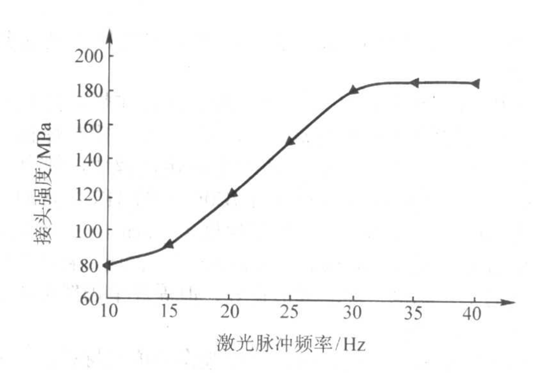


图 4.15-9 激光脉冲频率对接头强度的影响

2.2.3 钎焊

金属基复合材料可以采用软钎焊和硬钎焊进行连接，由于软钎焊的温度不超过 450℃，基体金属不熔化，不产生界面反应，避免了高温加热对复合材料的影响。硬钎焊是复合材料中常用的连接方法，可以分为保护气氛炉中钎焊、真空钎焊、电阻钎焊、浸沾钎焊和共晶反应钎焊连接，本部分主要介绍复合材料的硬钎焊工艺（以下统称钎焊）。

（1）钎焊特点及工艺参数

金属基复合材料钎焊时，钎焊温度、保温时间、连接压力是最主要的工艺参数，钎料类型、接头形式也是影响接头性能的重要因素。

钎焊温度对复合材料的接头性能有很大影响，当加热到一定温度时，增强相和基体金属之间将发生界面反应，生成脆性化合物层。例如，B/Al 复合材料加热到 550℃以上，界面反应生成 AlB_2 化合物；对于 C/Al 及 SiC/Al 复合材料，在 570℃左右可以生成 Al_4C_3 反应层；B/Ti 复合材料在 900℃左右，可以生成 TiB_2，钎焊温度在 700 ~ 800℃时，SiC 和 Ti 可以形成 TiC、Ti_5Si_3 等化合物，这些化合物层的厚度随温度的升高而急剧变厚。此外，钎焊温度的选择应考虑钎料的熔点，一般应比钎料熔点高 20 ~ 50℃

钎焊保温时间应与钎焊温度配合选择，在保证钎料熔化、铺展的前提下，尽可能选择短的钎焊时间。

钎焊及液相扩散连接复合材料时必须施加一定的压力，压力的选择应既能保证接合面之间的良好接触，又要考虑不使复合材料中的纤维发生断裂或损坏。

在选择钎料时，主要考虑对基体金属和增强相均能润湿和很好地铺展，在冶金上相容，并具有合适的钎焊温度，表 4.15-6 是常用的复合材料钎焊用钎料。例如 B/Al 复合材料真空钎焊最常用的钎料为 Al - Si - Mg 系或 Al - Si - Mg - Bi 系，采用 Al - Si - Mg - Bi 钎料时，钎焊温度可选 580 ~ 590℃，当钎焊时间为 5 min 时，接头剪切强度大于 80 MPa。

表 4.15-6 复合材料钎焊常用钎料

钎料（箔）	厚度/μm	熔化温度/℃	钎焊温度/℃	接头组合
BAl88Si（718L）	70 ~ 200	577 ~ 582	582 ~ 616	Borsic/Al - Ti
BAl93Si（713L）	25	577 ~ 612	600 ~ 620	B/Al - Ti
Al86.6Si11.6Mg1.5Bi	80 ~ 120	554 ~ 572	575 ~ 590	B/Al - Ti，SiC/Al - SiC/Al B/Al - B/Al，SiC/Al - Ti
BAl88Si + LF21 + BAl88Si （718L + 3003 + 718L）	BAl88Si 13 LF21 100	> 577	588	Borsic/Al - Ti Borsic/Al - Borsic/Al

复合材料钎焊前必须预先除去表面的氧化膜，并注意在整个钎焊过程中不被重新氧化。由于加工后表面存在裸露的增强相，这些增强相与钎料很难润湿，因此应对复合材料的表面进行改性处理（表面镀 Ni 等），以保证钎料对连接表面的完全润湿。

（2）Al_2O_3 短纤维增强铝基复合材料的钎焊



Al_2O_3 短纤维增强 6061 铝基复合材料自身以及与 6061 铝的连接一般采用真空钎焊，钎焊前表面应进行研磨和抛光处理，并在丙酮中超声波清洗，以除掉表面的油脂等污物。有两种钎料可供选用，一种是 BAl90Si（也称 AA4045），形态为 150 μm 厚的箔。另一种是类似三明治的复合钎料，名称为 BA03，钎料中间材料为 LF21 铝，厚度 150 μm，两侧各为 5 μm 厚的 BAl90Si 包覆层。采用对接接头进行钎焊，钎焊温度选择在 580 ~ 610℃之间，保温时间为 10 min，真空度为 5×10^{-3} Pa。

图 4.15-10 是钎焊温度对接头强度的影响，连接母材为 Al_2O_3 短纤维增强 6061Al 与 6061Al 合金。从图中可以看出，采用 BA03 钎料的接头强度明显高于 BAl90Si 钎料，例如，钎焊温度 590℃（863 K）时，复合材料/BA03/6061 接头的抗拉强度为 200 MPa，而相同钎焊温度下，复合材料/BAl90Si/6061 接头的抗拉强度只有 100 MPa。金相组织观察可知，采用 BAl90Si 钎料钎焊的接头，钎料和铝合金母材之间的界面消失，接合良好，而钎料与复合材料的界面不规则，有空穴存在，且 Al_2O_3 纤维呈无序分布，该无序层的厚度约 200 μm。采用 BA03 钎料钎焊的接头，钎料和 6061 铝合金的界面出现了空穴，但钎料和复合材料的界面即使在 600℃也没有观察到纤维重新排列的现象。

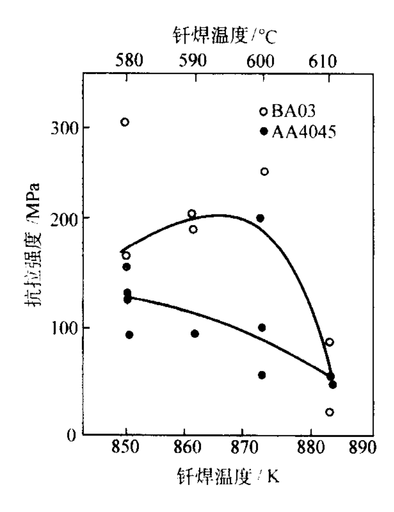


图 4.15-10 Al_2O_3/6061 复合材料与 6061 铝合金钎焊接头的强度

（3）B 纤维增强铝基复合材料的钎焊

B 纤维增强铝基复合材料可以采用软钎焊、浸沾钎焊、真空钎焊和电阻钎焊。钎焊时应选择合适的温度，防止液相钎料中的 Si 溶入基体发生脆化。

B/Al 复合材料管自身或复合材料与铝构件可采用软钎焊，例如发射卫星时的珩架结构，由 32 根 B/Al 管与铝合金连接件钎焊制造，采用 Sn96.5Ag 钎料，钎焊温度为 218℃，接头性能完全达到设计要求，还使支架减重 51%。

浸沾钎焊 B/Al - B/Al、B/Al - Ti 接头，可采用 Al - Si 钎料及其常规的浸沾钎焊工艺。在制造复合材料 T 型结构型材时，钎焊热循环为 538℃/4 min + 593℃/45 s。

真空钎焊 B_f/6061 铝基复合材料，可采用 BAl88Si 钎料。例如，对于宽 12.7 mm、板厚 0.9 mm 的复合材料进行钎焊时，可用搭接接头，搭接长度 6.4 mm，钎料厚度 80 ~ 150 μm，采用专门的不锈钢夹具施加一定的压力，钎焊温度 588℃，钎焊时间 30 min，接头的抗剪强度为 40 MPa。

（4）C 纤维增强铝基复合材料的钎焊

利用 Al - Si、Al - Si - Mg 等成分的钎料对 C/Al、C/Al - Zn 两种铝基复合材料进行了钎焊试验，结果表明 Al - Si 钎料对两种材料的润湿性都很差，不能实现冶金连接；而 Al - Si - Mg 钎料对这两种材料的润湿性都很好，可形成良好的焊缝。这表明 Mg 能改善钎料对铝基复合材料的润湿性。用 HL400 钎料配合 QJ201 钎剂，在温度（605 ± 5）℃、时间为 5 min的条件下钎焊 SiC/LD2 铝基复合材料可以得到令人满意的钎焊质量，接头抗剪强度可达 65 MPa，接头强度与焊接时间的关系如图 4.15-11 所示。

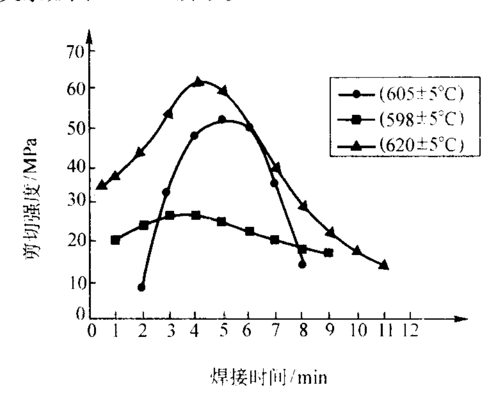


图 4.15-11 钎焊接头抗剪切强度与时间的关系曲线

2.2.4 扩散连接

金属基复合材料扩散连接时在接触面上将出现基体 - 基体、基体 - 增强相、增强相 - 增强相三种微接触形式，其中基体与基体之间较容易实现结合，基体与增强相之间较难实现连接，而增强相与增强相之间几乎不可能实现扩散结合。同时，材料表面有一层致密的氧化膜，用机械或化学方法清理后，它又立刻生成，因此控制接合区氧化膜的行为及增强相的接触状态，是复合材料扩散连接的难点。

（1）固相扩散连接

Al_2O_3 短纤维增强 6063 铝基复合材料固相扩散连接时，表面应进行电解处理，使增强相纤维凸出基体表面，在焊接过程中使纤维插入另一侧母材中，可显著提高接头强度。铝基复合材料对扩散连接的工艺参数非常敏感，在一定范围内，可得到最佳的接头强度，此时当温度变化 10 K 或焊接压力变化 1 MPa 时，都会引起接头强度的明显变化，如图 4.15-12 所示。

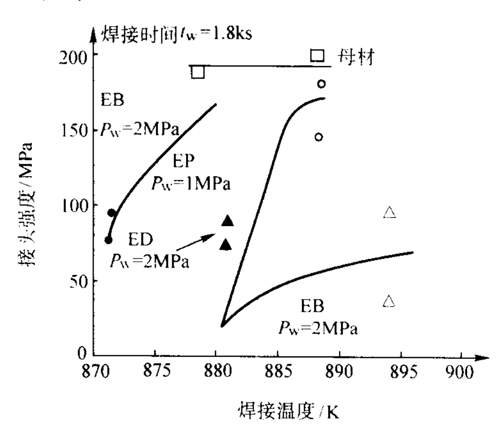


图 4.15-12 温度对 Al_2O_3/6063 扩散连接接头强度的影响

（2）液相扩散连接

1）瞬时液相扩散连接（TLP） 该方法是在低于母材和填充金属熔点的温度下，通过母材与填充金属相互扩散产生低熔点共晶成分而形成液态，然后等温凝固、成分均匀化后可获得良好的扩散连接接头。

采用 Ga 作为中间层材料扩散连接铝基复合材料 SiC_p/6061Al，在 150℃的温度下，可以和时效同时进行。也可采用与母材形成低熔点共晶物的 Cu、Ag 作为中间夹层，在连



接时接合面出现液相共晶物，并可获得高强度接头（见表4.15-7）。通过组织观察发现，采用铝合金作为中间层时，接头区域不可避免出现无纤维强化层，以 Cu、Ag 作为中间夹层时，在接合面处发现大量的折断纤维。

表 4.15-7　夹层金属对接头抗拉强度与断裂位置的影响

中间层材料	连接温度 /K	连接压力 /MPa	抗拉强度 /MPa	断裂位置
无中间层	873	2	98 97	B.I B.I
A2017 (75 μm)	883	1	161	B.I
	873	2	184	B.M
		1	173	B.I
A2017 (30 μm)	883	1	177	B.I
	873	2	187	B.I
Ag (16 μm)	873	2	188 145	B.I B.I
Cu (15 μm)	883	1	125	B.I
	873	2	179，181	B.M，B.I
		1	162	B.I
	823	1	119	B.I

注：B.I：连接界面，B.M：母材。

扩散连接 SiC 晶须增强铝基复合材料 SiCw/6061Al [18%～20%（体积分数）] 时，其工艺规程为：在 28＃砂纸表面打磨、真空度 133.322×10^{-3}%、温度 600℃、压力 4 MPa、保温时间 30 min。直接或以 Al 作为中间夹层进行扩散焊接时，接头强度为270 MPa，接近母材强度；而以 Cu 作为中间夹层时得到的接头强度仅为 50～60 MPa。

2）夹层与非夹层液相扩散连接　采用 Al-Cu-Mg 系合金作中间层对 SiC 纤维增强铝基复合材料与纯 Al 进行扩散连接，当中间层液相体积分数介于 1%～5%时，接头强度较为稳定，但微观组织分析表明，此时也只是复合材料基体与铝合金中间层结合良好，而 SiC 纤维与中间层铝合金未获得良好结合，此时接头强度低于母材强度，如图 4.15-13 所示。

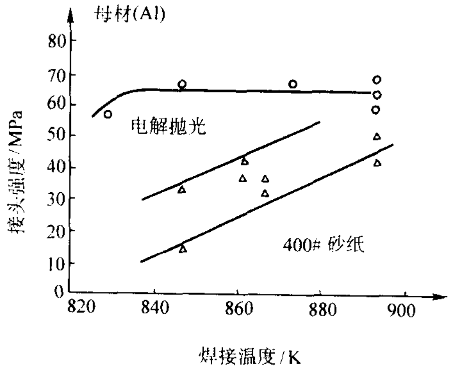


图 4.15-13　扩散连接 SiC/Al－Al 合金扩散连接接头的强度（2017 夹层）

试验研究可知，在铝基复合材料液、固相温度区间存在一个"临界温度区域"，在该温度区域内扩散连接时，接合界面形成液相，接头强度可显著提高（见图 4.15-14）。采用透射电镜对比分析铝基复合材料母材以及扩散连接接头区域基体与增强相的界面状态时可知，基体与增强相的界面出现微量界面反应物，但未明显改变增强相形貌。

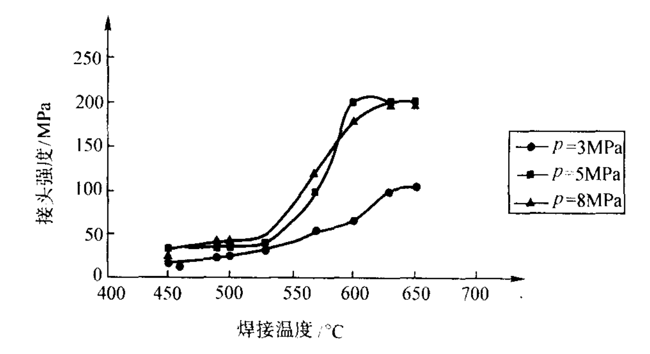


图 4.15-14　连接温度对铝基复合材料接头抗拉强度的影响

2.2.5　电阻焊

电阻焊由于加热时间短，可控性好，能有效地抑制增强相与基体间的界面反应，并在压力作用下接头区不易产生气孔、疏松、裂纹等缺陷。电阻焊连接铝基复合材料的主要问题是由于增强相的存在使电流线和电极压力的分布复杂化，给焊接参数的选择及焊接质量控制带来了困难。试验表明，复合材料电阻焊规范选择时，热输入过大会造成熔化的基体金属发生飞溅，在接合界面上露出增强相纤维，降低材料的焊接性能；过大的压力使得接头区发生明显变形并破坏增强相纤维；压力过小时接合界面上也容易发生飞溅，降低接头强度。

B 纤维增强铝基复合材料电阻焊接时，增强相的体积分数对其电阻焊焊接性有一定的影响，随着纤维体积分数的增大，熔核中熔化金属的流动性变差，接头强度降低。当 B 纤维的体积分数从 35%上升到 50%时，接头强度可降低 10%左右。在进行 B/Al－Al 合金点焊时，由于两种材料的电阻率不同，应采用不同的电极，B/Al 复合材料一侧可采用高导电率材料的锥台形电极，而铝合金侧可采用低导电率材料的球面电极。

C_f/Al 基复合材料（含 7%Zn）电阻焊接时，可采用含 12%Si 的 Al 合金作中间层，选择电极压力 1 780 N、焊接电流 5 000 A、焊接时间 5 周波。

2.2.6　摩擦焊

摩擦焊接时，两个接触面相对高速旋转，同时在一定的轴向压力下使接触面产生塑性流变而实现连接，在整个焊接过程中母材不发生熔化。该方法适合于颗粒增强型复合材料的连接，对于纤维增强复合材料，由于在被连接材料表面附近发生较多的塑性变形，将导致增强相的严重断裂。

管材和棒材最适合采用摩擦焊进行连接，对于壁厚 1.78 mm、外径 25 mm 的 Al_2O_{3P}/6061 复合材料管（含 10% Al_2O_3，T6 处理）同种材料对接，其规范参数为摩擦焊转速 2 625～3 280 r/min、转动时的轴向压力 3.8 MPa，接头强度为 280～294 MPa，强度系数为 79%～83%。

SiCp/2618Al 复合材料同种管材对接摩擦焊也有应用，复合材料中 SiC 的含量为 14%，材料为 T6 热处理状态，摩擦焊转速为 950 r/min、摩擦压力 120 MPa、顶锻压力 180 MPa、顶锻速度 1.7 mm/s，控制顶锻变形量为 8 mm，则接头抗拉强度可达 328 MPa，强度系数为 84%。此时，接头区域 SiC 颗粒破碎，Al 基体晶粒通过动态回复而细化，焊接过程中材料的塑性流变并未改变粒子的流动特点，焊缝中增强相的体积分数与母材极为接近。

3　树脂基复合材料的连接

3.1　树脂基复合材料的连接特性

先进树脂基复合材料在航空航天等领域有着广阔的应用，新一代战斗机的用量已占结构质量的 25%～30%，主要



构件为前、中机身，机翼蒙皮、框、梁、壁板等。B777用量增加到9 900 kg，占结构总量的11%。树脂基复合材料在实际应用时，也需要进行连接。

由于热固性树脂基复合材料的聚合物基体为胶连结构，在高温下不仅不能熔化，而且还会被碳化而破坏，所以它不能被焊接，只能够采用机械固定和胶黏的方法进行连接。对于热塑性树脂基复合材料，聚合物键是通过二次化学键结合在一起的，在受热的情况下，二次化学键会变弱或破坏，热塑性树脂基体变为熔融状态。因此，它除了用机械固定和胶黏的方法外，还可以通过熔焊进行连接。

3.2　树脂基复合材料的连接

3.2.1　熔化焊

树脂基复合材料比较常用的熔焊方法有热板焊、热气焊、电阻扦入焊、感应焊接、红外和激光加热焊、微波加热焊、摩擦焊、超声波焊等。其工艺过程为：表面处理、去除油脂等污物，加热被焊表面至熔融流动状态，加压、促进流动和润湿及分子扩散，分子间扩散和聚合物链的缠结，热塑性材料的冷却和凝固，形成焊接接头。

值得注意的是，对于半结晶态热塑性树脂基复合材料，冷却速度会影响基体中晶体的比例。一般来讲，冷却速度快时晶体的比例较小，接头的韧性较高，耐溶剂性能较差；冷却速度慢时晶体的比例较大，接头的耐溶剂性能较好，而韧性较差。

1）热板焊　热板焊的过程与钎焊类似，都是通过加热的介质将热量传给工件，使工件熔化或熔融。热板焊是先将热板放在被连接的工件之间，使被连接工件同时与热板直接接触，进而将被连接的表面加热软化，然后迅速撤离热板，并对被连接工件加压，使分子充分扩散，最终达到连接的目的。由于工件直接与热板接触，容易造成工件与热板的粘连。为了防止粘连，可在金属板表面事先涂上聚四氟乙烯涂层；对于高温聚合物，可采用特制的青铜合金板以减小粘连。采用不接触的热板加热方式也可以防止粘连，但是必须提高板的温度，依靠对流和辐射加热被连接件的表面，这样就大大降低了加热效率。

热板加热焊接对加热形状的适应性差，适合单一形状的小部件大批量生产。对于高导热性增强相的复合材料不适合，热板抽出后，被连接件在对中和加压之前表面就已经冷却，无法进行连接。

2）热气焊　热气焊就是利用热蒸汽加热的一种树脂基复合材料的连接方法。由于它采用热气流作为热源，是一种非常灵活的连接方法，不受被连接面形状的限制，并且还可以外加填充材料实现两部件的连接，适用于低熔化温度、变几何形状、小体积部件的树脂基复合材料焊接。其主要缺点是焊接面积小、焊接速度慢。

3）电阻扦入焊　电阻扦入焊是将电阻加热元件扦入被连接件的表面，通电后电阻元件产生热量而实现焊接，在加热结束后并不将加热元件取出，而是直接加压，加热元件留在接头内部，成为接头的一部分。因此，该种焊接方法要求加热元件与基体复合材料具有很好的相容性，并且能够很好的结合在一起。图4.15-15为电阻扦入焊接示意图。

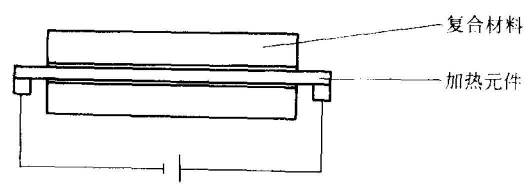


图4.15-15　电阻扦入焊接示意图

4）感应焊接　感应加热焊接时，将加热元件嵌入被连接件表面，根据磁场在导体中产生涡流的原理，利用材料的内部电阻热实现材料的焊接，图4.15-16是感应焊接示意图。感应焊接所用的加热元件通常是金属网或含有弥散的金属颗粒的热塑性塑料膜。该方法可以用来连接非导电纤维复合材料和导电纤维复合材料。对于导电纤维复合材料，应在连接表面放入比增强纤维导电性好的加热元件，使界面优先加热。

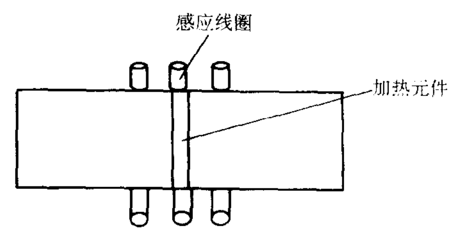


图4.15-16　感应焊接示意图

5）超声波焊接　热塑性树脂基复合材料的超声波焊与金属的超声波焊相同，依靠振动时被连接件表面的凹凸不平处产生周期性的变形和摩擦，并产生热量而实现连接。为了改善材料的焊接性和加速熔化，通常人为的在连接表面制造一些突起。为了将超声波能量施加到待焊构件上，振动声波极和底座之间应加一定的压力，必要时还需要放大振幅。冷却时仍然需要施加压力，以保证获得成形良好的接头。超声波焊接接头的强度不但取决于选择的超声波能量、压力，还与焊缝形式有关。一般来讲，超声波焊接时间比较短，大约在1 s以内，可通过对焊缝质量的间接监测而实现焊接过程的闭环控制。

3.2.2　胶粘

胶粘是依靠胶层把零件连接起来，被连接件和胶黏剂之间保持着清晰的界面，且连接过程中复合材料不承受外加热循环。连接树脂基复合材料常用的胶结剂主要有环氧树脂、聚酰亚胺、酚醛树脂剂有机硅树脂等几种。粘接前，被粘接表面要进行清洗和打磨，并设计合理的接头形式，胶接接头多数都采用搭接。

粘接连接在拉伸载荷作用下，有三种基本破坏形式，被胶接件拉伸（或拉弯）破坏、胶层剪切破坏和剥离破坏（包括胶层破坏与被胶接件剥离破坏）。复合材料的胶粘质量受很多因素的影响，如胶接件材料的性质，胶黏剂的性质，胶接件的形状和接触面积，涂胶方法和涂胶规范等。因此，接缝处存在强度低、寿命短、质量难以保证的缺点。胶粘连接发生破坏与连接形式、连接几何参数、临近胶层的纤维方向及载荷性质有关。在连接几何参数中，被连接件厚度起着极为重要的作用。被胶接件很薄，连接强度足够时，被胶接件发生拉伸（拉剪）破坏；当被胶接件胶厚，但偏心力矩尚小时，易在胶层发生剪切破坏；当被胶接件厚到一定程度，胶接连接长度不够大时，在偏心力矩作用下，将发生剥离破坏。

4　C/C复合材料的连接

C/C复合材料是以碳为基体，采用C纤维或其制品（碳毡或碳布）增强的复合材料。它具有质量轻、高强度、良好的力学性能、耐热性、耐腐蚀性、减振特性及热、电传导特性等。在航空航天、核能、军事以及许多民用工业领域有极大的应用前景。C/C复合材料常用的连接方法主要有扩散焊接和钎焊。

1）扩散焊接　C/C复合材料一般采用加中间层的办法进行扩散连接，中间层材料可以采用石墨、B、Ti或$TiSi_2$等。不管那种方法，都是通过中间层与C的反应，形成化合



物或晶体而达到连接的目的。

用B或B+C中间层扩散连接C/C复合材料时，B与C在高温下发生化学反应，形成硼的碳化物。图4.15-17是接头抗剪强度与连接温度的关系。所用试件的尺寸为25.4 mm×12.7 mm×6.3 mm，三维纤维增强。由图中可知，扩散连接温度低于2 095℃时，B中间层的接头强度比B+C中间层的强度高，而温度超过2 095℃以后，由于B的蒸发损失，使接头强度急剧下降。扩散连接压力对接头抗剪强度有很大影响，在1995℃连接温度下，扩散连接压力由3.1 MPa增加到7.38 MPa时，接头在1 575℃的抗拉强度由6.9 MPa增加到9.7 MPa。

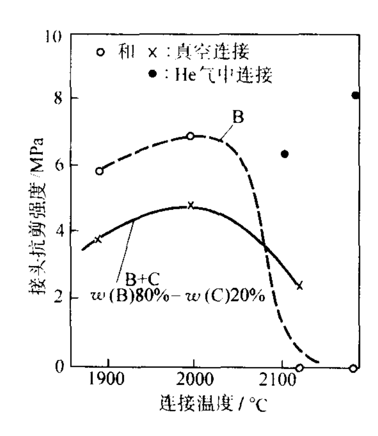


图4.15-17 连接温度对C/C复合材料接头抗剪强度的影响

用$TiSi_2$作中间层扩散连接C/C复合材料时，接头中出现了液相，具有固相扩散和液相扩散连接的特点。连接时，将纯度为99.4的$TiSi_2$粉放在试件中间，试件尺寸仍然为25.4 mm×12.7 mm×6.3 mm。采用变温度的方法进行扩散连接，先在0.69 MPa压力下升温到1 310℃，然后去掉压力升温到1 490℃，在该温度下保温时间为2～15 min。图4.15-18是试验温度对上述接头抗剪强度的影响，从图中可知，在1 100～1 300℃的试验温度下接头具有较高的强度，其最大值可达40 MPa以上。

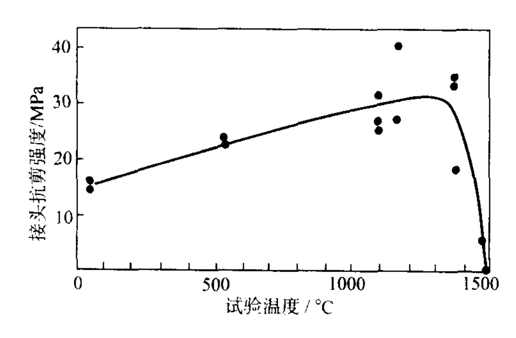


图4.15-18 试验温度对C/C复合材料接头抗剪强度的影响

2）钎焊 C/C复合材料在加热过程中会释放出大量的气体，对钎焊工艺和接头质量产生不良影响，钎焊前应在真空或氩气中、高于钎焊温度100～150℃条件下进行除气处理。由于C/C复合材料存在一定的孔隙，钎料难以保持在表面，将向母材中渗透，使接头强度降低。

C/C复合材料的钎焊都是在气体保护的环境中，最好的接头形式是搭接。在高温下加不同填充材料进行的。所加的填充材料可以是金属，也可以是非金属，有硅、铝、玻璃、化合物等。其中连接效果比较好的是用硅作填充材料。在1 673 K时，虽然Si与C发生反应生成SiC，但是试验表明它对接头强度并没有太大的影响，接头的力学性能完好。

5 陶瓷基复合材料的连接

陶瓷基复合材料具有耐高温、耐腐蚀、耐磨、抗疲劳、线膨胀系数小等特点，在发动机高速轴承、活塞、封闭环、阀门导轨的制造中得到应用。例如，SiC/C_f复合材料用于狂风战斗机M88发动机的喷嘴瓣以及幻影2000战斗机涡轮风扇发动机的喷管内调节片。

陶瓷基复合材料分为粒子增强、短纤维（晶须）增强、长纤维增强三种增强机制。由于长纤维的增强效果最好，所以长纤维增强陶瓷基复合材料成为目前最重要的一类高温结构陶瓷材料。

陶瓷基复合材料的连接非常困难，陶瓷基体具有高熔点、高温分解、电绝缘性等特点使陶瓷基复合材料不适合用熔焊、电阻焊，陶瓷的固有脆性使其不能承受焊接过程中集中加热所带来的热应力，以及无法进行施加大压力的固相扩散焊接。此外，陶瓷基复合材料的连接中还要注意避免增强相与基体之间的不良反应、避免增强相自身的氧化和性能的降低。

陶瓷基复合材料的连接方法主要有：粘接、钎焊、无压固相反映连接、瞬间过渡液相连接、微波连接及自蔓延高温合成连接法等。

陶瓷基复合材料的钎焊与陶瓷钎焊基本相同，可采用含有Ti、Zr等金属的钎料进行活性钎焊，也可以先在复合材料表面进行金属化后，然后再用一般的钎料进行钎焊。

无压固相反应连接是利用高温下活性金属与陶瓷基体的反应形成化合物将复合材料连接起来。连接时不能施加很大的压力。这种连接方法可以形成致密的接头并且可以耐高温，但是力学性能很差，不能承受载荷。

微波连接是被连接表面经过研磨后旋压覆盖一层SiO_2薄膜，经过200℃、1 h的干燥后，再用微波加热，在不加压的条件下进行连接。这种连接方法，克服了陶瓷基复合材料耐压性能差的缺点。

编写：刘黎明（大连理工大学）
冯吉才（哈尔滨工业大学）



第 16 章　塑料的焊接

1　概述

塑料是指以合成或天然的高分子化合物为母料，配以各种添加剂，如填料、增塑剂和防老剂等，在一定条件下塑制成型的柔韧性或刚性固体材料。在塑料加工领域中，由塑料母料生成塑料型材或制品的工艺称为一次加工工艺，或成形工艺；对塑料型材或制品的进一步加工称为二次加工工艺。塑料焊接属于塑料的二次加工工艺。

人类历史上第一个人造塑料——硝化纤维素塑料，是英国发明家 Alexander Parkes 发明的，并于 1862 年在伦敦举行的大国际展览会上展出。在 20 世纪，塑料从种类到应用都得到了迅速发展，与橡胶和纤维一起并称为三大高分子材料，全世界塑料总产量从 1935 年的 20 万吨增加至 2000 年的 1.5 亿吨。目前，塑料工业已成为世界上各工业部门中发展速度最快的领域之一，就体积而言，塑料总产量已经超过了钢的产量。塑料与钢材、木材和水泥一道构成了现代工业的四大基础材料，成为整个国民经济发展不可缺少的重要材料。

塑料密度小、化学稳定性好，对酸、碱和有机溶剂均有良好的抗腐蚀性能，同时塑料还具有优良的电绝缘性能、耐磨、减摩和自润滑性能，特别是某些塑料能在较宽的温度范围内承受机械冲击或在比较苛刻的物理化学环境中使用，因此，无论是在机械、汽车、电子电器、化工、建筑、包装等传统工业领域，还是在宇航、生物工程、信息技术、微电子、原子能及生命科学等高新技术领域，都得到了愈来愈广泛的应用。目前，塑料正朝着高性能化、高功能化、多用途和低成本方向发展。

塑料是一个包含着结构不同、性能各异、应用广泛的许许多多品种的大家族，分类方法多种多样。如根据其性能和用途的不同，可分为通用塑料和工程塑料。通用塑料性能一般、价格低、用途广、产量大，广泛用于日常生活和一般制品；工程塑料具有优良的力学性能或某些特殊性能，如耐热性、自润滑性、导电性等，应用于各类工程技术领域。此外，还可以按照塑料的化学结构、受热行为和结晶状态等进行分类。

根据温度作用与塑料形态的关系，人们把塑料分为热塑性和热固性两大类。热塑性塑料可以在一定的温度作用下软化直至塑性流动，冷却又重从硬化。在这一可以反复多次的可逆变形过程中，塑料高分子的化学性质不变。当温度高于极限温度以后，热塑性材料会化学分解。热固性塑料在成形过程中产生不可逆的交联化学反应、形成网状大分子结构，这种结构一旦形成就不溶解、不熔化，也不能再黏滞地流动，正因如此，这种塑料被称为“热固性”塑料，过高的温度下，热固性塑料会发生碳化。

塑料的焊接是指在热和/或力的作用下，将两个或多个塑料部件连接起来的技术。由于热固性塑料一次加工成形后的不熔性质，使热固性塑料无焊接性能可言，所以塑料的焊接仅指热塑性塑料的焊接。

热塑性塑料可以分为结晶性和非结晶性两类。严格地讲，塑料的结晶都是不完全的，所以结晶性塑料常称为部分结晶塑料，而非结晶塑料也称为无定形塑料。典型的结晶塑料有聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）、聚酰胺（俗称尼龙，PA）和聚甲醛（POM）等，典型的非结晶性塑料有聚氯乙烯（PVC）、聚苯乙烯（PS）、有机玻璃（PMMA）、聚碳酸酯（PC）和 ABS（丙烯腈－丁二烯－苯乙烯的共聚物）等。表 4.16-1 列出了几种塑料的种类、结晶性和可焊接性，由表可以看出，由于塑料材质不同，如硝酸纤维素受热易燃，有些热塑性材料也是不能焊接的。

表 4.16-1　几种塑料的种类、结晶性和可焊接性

种类	结晶性	塑　料	可焊接性
热塑性	结晶性塑料	赛璐璐	○
		聚乙烯	○
		聚丙烯	○
		聚氧化甲烯	○
		聚酯	○
		聚偏氯乙烯	○
		尼龙	○
		聚乙烯醇	○
	无定形塑料	聚苯乙烯（PS）	○
		聚氯乙烯（PVC）	○
		有机玻璃（PMMA）	○
		聚碳酸酯（PC）	○
		聚砜（PSU）	○
		ABS	○
		聚醋酸乙烯	○
		聚醋酸乙烯－氯乙烯共聚物	○
		硝酸纤维素	×
热固性	无定形塑料	有机硅	×
		蜜胺树脂	×
		环氧树脂	×
		酚醛树脂	×

注：○—可焊；×—不可焊。

描述热塑性塑料使用性和工艺性的重要温度参数是玻璃化温度 T_g，黏态流动温度 T_f，熔融温度 T_m 和热分解温度 T_d。结晶性塑料在晶体熔融温度 T_m 以上、非结晶塑料在黏态流动温度 T_f 以上的温度条件下，固体塑料熔融变为黏滞的流体。因此，T_m 或 T_f 与热分解温度 T_d 之间的温度区域就定义了热塑性塑料工艺加工的温度窗口，塑料的焊接就是在这个温度窗口内进行的。T_m 或 T_f 的数值越高，塑料焊接的温度就越高，设备成本因此也越高；T_m 或 T_f 与 T_d 之间的温度区域越窄，塑料焊接的操作越困难。一些典型热塑性塑料的玻璃化转变温度 T_g，黏态流动温度 T_f 和晶体熔融温度 T_m 见表 4.16-2。

表 4.16-2　一些典型热塑性塑料的玻璃化转变温度 T_g，黏态流动温度 T_f 和晶体熔融温度 T_m

项目	塑料种类	T_g/℃	T_f/℃	T_m/℃
结晶性塑料	高密度聚乙烯(HDPE)	－120～－125	—	130～137
	低密度聚乙烯(LDPE)	—	—	105～110
	聚丙烯(PP)	－10～－18	—	168～174
	尼龙(PA)	45～50	—	205～220
	聚甲醛(POM)	－50～－80	—	165～175
	聚对苯二酸丁二醇酯(PBT)	—	—	230
非结晶性塑料	聚苯乙烯(PS)	80～100	175～195	—
	聚氯乙烯(PVC)	70～87	150～160(软)	—
	有机玻璃(PMMA)	75～105	160～180	—
	聚碳酸酯(PC)	148～152	215～225	—
	聚砜(PSU)	189～196	285～300	—
	ABS	—	180～190	—

2 塑料焊接的特点

塑料焊接的基本原理是在热和力共同作用下，热熔状态的塑料大分子在压力作用下相互扩散，产生范德华力，从而紧密地焊接在一起。根据这个原理，塑料焊接的必要条件为：

1）导致塑料熔融流动的焊接温度；

2）促进大分子相互扩散，并挤去焊缝中残余气隙的焊接压力；

3）压力及温度的作用时间，在这段时间里，塑料从热熔融直至从新冷却硬化，建立起足够的焊接强度。

塑料焊接可以使用焊条作为填充材料，也可以直接加热焊接而不使用填充材料。由于塑料材质和种类，以及所用焊接方法的不同，具体的焊接温度、焊接压力和作用时间各不一样。下面简要讨论影响塑料焊接性能的共性因素。

塑料的焊接工艺首先应该根据母材的焊接性能制订。除了母材因素外，塑料的一次加工过程也是影响焊接性能的重要因素之一。通常，由于一次成型加工，塑料内的组织结构、分子取向状态、结晶度以及内应力等均已发生变化，这些变化往往影响塑料的焊接性能或者焊接强度。

为了保证焊接质量，焊接表面必须清洁，不被污染，为此，常在焊接前对焊接表面作脱脂去污处理。在进行这步工作时，必须注意选用的脱脂清洁剂不能溶解被焊接塑料，也不应使之膨胀。

在绝大多数情况下，焊接表面还必须做平整与平行的预加工处理。例如管道端面对接焊时，必须先用平行机动旋刀削平两个管材的被焊端面，并保证这两个端面相互接触时基本平行；又如用于超声波焊接的塑料注塑件，其注塑模具应保证该构件的焊接面平整并能相互平行接触。此外，热气焊或挤塑焊的母材常需加工坡口，坡口也有平整、平行和对称的要求。焊接表面或者坡口的预加工可以使用通用的切削机床，也可手工使用刀片细心加工。

3 塑料焊接方法

焊接方法是决定焊接质量的关键因素，很多的塑料焊接技术是金属焊接技术的扩展或改进。目前，已在工业技术中得到应用的塑料焊接方法见图4.16-1。本节分别介绍各种焊接方法的原理、特点、接头设计、应用场合及影响焊接质量的因素。

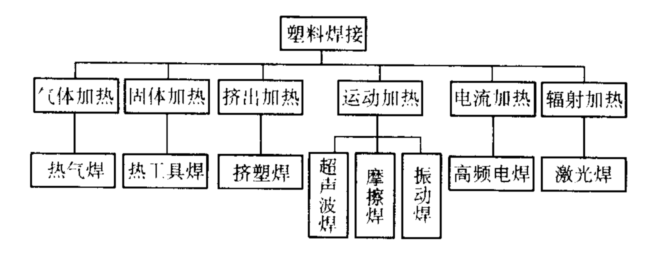


图 4.16-1 按热能方式分类的塑料焊接方法

3.1 热气焊

利用被加热的空气或惰性气体将被焊工件表面和焊条加热至一定温度，并通过手动或机械方式对焊接区施加焊接压力，从而将塑料连接起来的方法称为热气焊。热气焊的一般原理如图4.16-2所示，从图中可以看出，塑料的热气焊与金属的氧乙炔焊类似，只是提供焊接所需热能的气体火焰为被加热的气体流所代替。热气焊在塑料的焊接中历史最长，具有通用性好、应用广泛的特点。

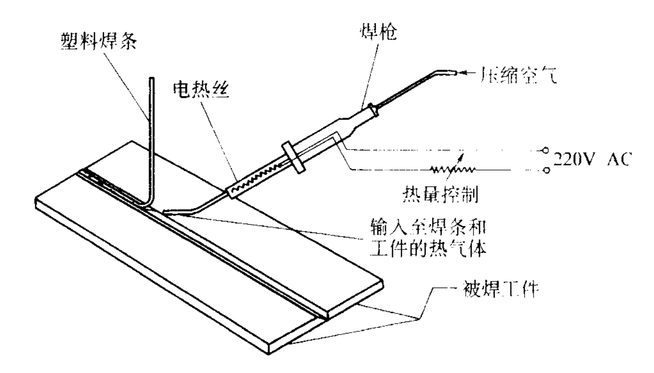


图 4.16-2 热气焊接示意图

热气焊枪对焊接气体的加热有电热式和火焰加热式两种。焊接气体在流经电加热的管道（图4.16-3a）或穿过火焰加热的蛇形管（图4.16-3b）时，被加热到所要求的热气温度，然后由喷口喷出。焊接压力一般通过焊条自身的刚度，或是通过其他辅助手段如压轮（图4.16-4）等，传递至焊接区。

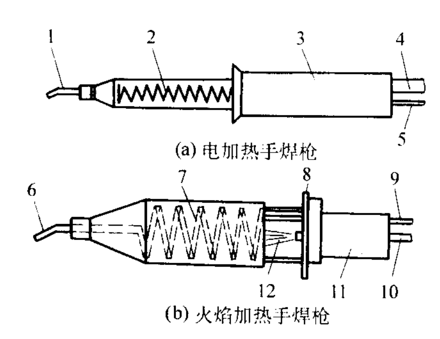


图 4.16-3 热气焊手焊枪的两种形式

1—喷口；2—电加热丝；3—把手；4—压缩空气进口；5—电引线；6—喷口；7—蛇形管；8—隔热板；9—压缩空气进口；10—燃气进口；11—把手；12—燃气火焰

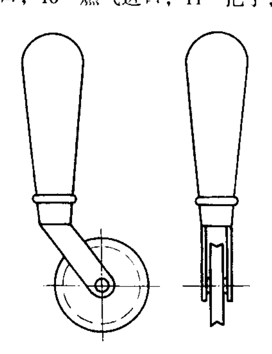


图 4.16-4 热气焊的辅助压实工具

热气焊过程中作为焊接热源载体的气体必须去油、去水分，然后在 $1.0\times10^4\sim5.0\times10^4$ Pa 的压力下通入焊枪被加热。出于安全考虑，热气焊不使用可燃气体作为热源气体，通常采用压缩空气。某些塑料（如聚乙烯、聚丙烯和聚酰胺等）对空气中的氧很敏感，氧对塑料表面的氧化会使粘接性降低，为了避免这一问题，需要采用惰性气体，经常用的是氮气。

可以用热气焊方法进行焊接的塑料品种有聚氯乙烯（PVC）、聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）、聚甲醛（POM）、聚酰胺（PA）以及聚苯乙烯（PS）、ABS、聚碳酸酯（PC）等。热气焊时，塑料并没有达到流动状态，而是在黏稠状态下进行的。与金属相比，塑料的导热性不好，所以把表面层加热到黏稠状态所需要的热量并不多，需要的时间也不长。根据

被焊塑料品种的不同，热气焊的温度范围也不尽相同。几种典型塑料热气焊的温度范围可参见表4.16-3。

表4.16-3 典型塑料热气焊的温度范围

塑料种类	聚氯乙烯	聚丙烯	有机玻璃	聚碳酸酯	聚甲醛
热气温度/℃	210±20	220±20	250±10	330±10	230±10

通常采用与母材材料相同的焊条。不宜采用含增塑剂多的焊条进行焊接，增塑剂含量越多，则焊缝强度越低，其耐热性、耐蚀性也越差。焊条直径越大，生产效率越高，但直径过大时，由于焊枪喷出的热气流在短时间内不能使焊条里外均匀受热，焊缝内部会产生应力，从而引起焊缝收缩并出现裂纹，影响焊接质量。所以在实际操作中，焊条直径一般不超过4 mm。焊条规格有单焊条、双焊条以及一些型材截面的焊条（如三角形、矩形和椭圆形）。双焊条是双条并联，中间略呈凹槽，断面呈“8”字形，其焊接效率比单焊条高40%左右。双焊条受热均匀，焊缝强度也较高。单焊条及双焊条的规格及其选用分别列于表4.16-4和表4.16-5中。

表4.16-4 单焊条规格及其选用

直径/mm	适合板材厚度/mm	容许公差/mm	长度/m
2	2～3（或用于焊根焊接）	±0.3	>0.5
2.5 3	4～8	±0.3	>0.5
3.5	8～15	±0.3	>0.5
4	>15	±0.3	>0.5

表4.16-5 双焊条规格及其选用

图形	尺寸			适合板材厚度/mm	容许公差/mm	长度/m
	d	L	h			
（图：h, L, d）	1.5	1.5	1.2	<8	±0.3	>0.5
	2.0	2.0	1.7			
	2.5	2.5	2.2	≥8		

被连接的热塑性塑料板需要进行必要的坡口加工和表面清理，合理的坡口加工和表面清理可以提高塑料焊接接头的强度。图4.16-5为几种焊接接头的坡口形式，应注意在两个边缘之间应留有根部间隙，以保证焊透。通常采用磨沙机和刨床在大厚板上切削加工光滑的坡口，对于薄板而言，可以用刀片消出所需坡口。坡口必须平直，全长均匀一致，但不宜过于光滑，必要时要将坡口表面打磨毛糙，以增加焊接强度。此外，切削加工后的表面以及焊条必须保持清洁，不被污染，一般要对被连接表面进行机械打磨，或者有时用必要的溶剂来清洁，但应注意不能采用对塑料产生破坏或造成应力开裂的溶剂。另外，焊前还应将塑料件制造过程中使用的润滑剂和拔模剂从表面完全清除掉，在对焊接表面作脱脂去污处理时，不得使用导致塑料溶解或膨胀的处理剂。

与焊接金属类似，塑料的焊接也有多种接头形式。表4.16-6给出了几种基本的焊接接头形式。接头形式的选择取决于以下三个因素。

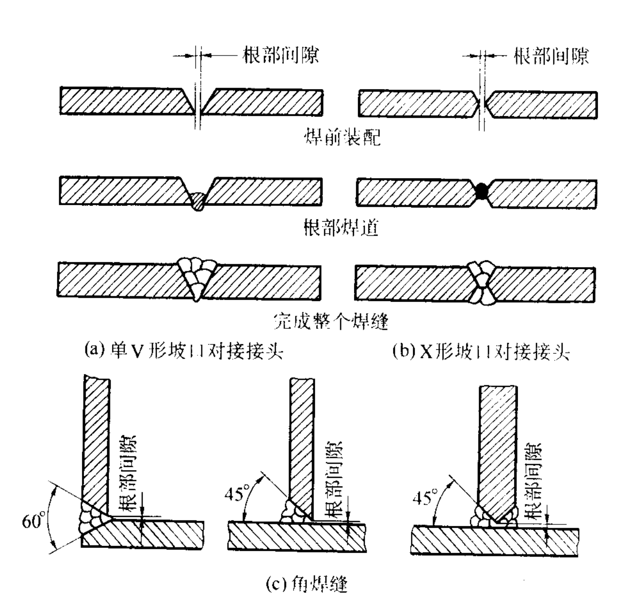


图4.16-5 几种典型接头形式和焊接过程

表4.16-6 塑料焊接接头形式及坡口加工尺寸

种类	图示	尺寸/mm	应用说明
对接	（图：α, S, a, b）	$a \leqslant 1$，$b = 0.5$； $S \leqslant 5$ $\alpha = 60° \sim 70°$ $S > 5$ $\alpha = 70° \sim 90°$	适用于板厚≤5 mm和只能在单面进行焊接的对接焊缝（如衬里）
	（图：β, a, S, b）	$S \leqslant 10$ $\beta = 60° \sim 70°$ $S > 10$ $\beta = 65° \sim 70°$	适用于板厚大于5 mm的板。这种对接焊缝抗拉强度高，省焊条
搭接	（图：l, a）	$l \geqslant 3a$	不宜用于承载焊缝
T形接头	（图：α, a）	$a \leqslant 1$； $\alpha = 45° \sim 55°$	用于焊接安装在塔或容器内的架子、隔板等，如两面能焊，应尽可能采用K形坡口

续表 4.16-6

种类	图示	尺寸/mm	应用说明
角接头		$a \leqslant 1$; $\alpha = 45° \sim 55°$ $\beta = 65° \sim 70°$	用于容器衬里底部与侧壁的连接焊缝
			用于焊接板厚 $\leqslant 10$ mm 的容器底与容器壁的连接焊缝
			用于焊接板厚大于 10 mm 的容器底与容器壁的连接焊缝

1）载荷特点，工作中承受载荷为拉伸还是压缩，是否有弯曲、疲劳、冲击载荷，或复合载荷存在。

2）载荷的施加方式，指载荷是稳态的、变化的还是骤加的载荷。

3）焊前准备和焊接的成本　设计时要选用既满足载荷要求又最为经济的接头形式。角对接接头仅适用于对接头强度要求很低的场合，一般不能承受外力。如果焊接接头需要承受较大的外力，则应优先考虑图 4.16-6 所示的接头形式。

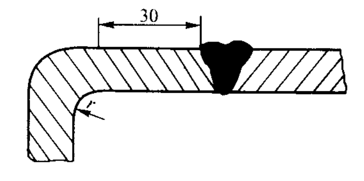


图 4.16-6　改善焊接接头受力条件的角对接接头

起焊点强度对于焊缝强度有重要影响，所以应十分重视焊接的起始点。可以采用图 4.16-7 所示的起焊方法，首先加热焊条端部使其弯曲成直角，并迅速插入已加热的焊缝中，同时将焊条端部在焊缝坡口外留出 10～15 mm，在焊接完毕后再将留出部分割掉。也可以在焊前将焊条斜切出薄而易熔化的边缘，起焊时先加热边缘处斜削出的尖端，并在轻压下敷于焊板上，然后在焊条上施加均匀的压力，并与焊件一起加热连续进行焊接。

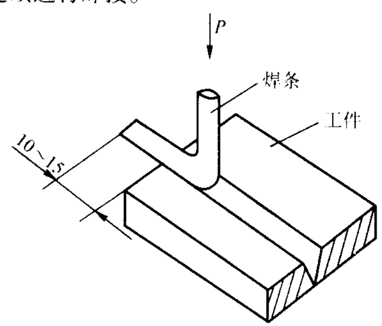


图 4.16-7　热气焊起焊方法示意图

适当的坡口加工和表面处理后，将被连接板安装在木质底板上进行焊接，金属底板会将热量从焊接区导走，导致不良的焊接接头，因此不宜使用。

焊接时，焊条应紧顶在坡口的焊接表面上，然后纵向摆动焊枪以均匀加热塑料焊条和母材焊接区，直至熔融焊合（如图 4.16-8 所示）。在整个焊接过程中，焊条及对焊条施加的力都应与焊缝垂直（图 4.16-9a），焊条与焊缝夹角大于 90°时（图 4.16-9b），会使焊条伸长率过大，焊道变细，在冷却时焊缝内产生收缩应力，出现小气泡或断裂；当角度小于 90°时（图 4.16-9c），由于焊条过于靠近焊枪，使焊条一段一段地同时软化并敷于焊缝内，会在焊缝中形成一个个波纹，使焊缝强度和致密性大大降低。

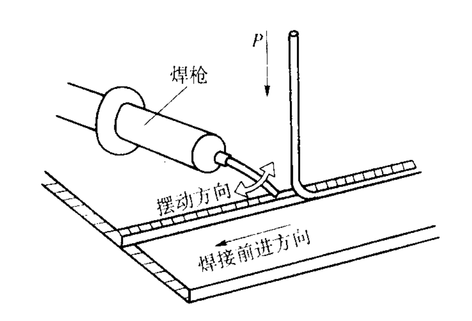
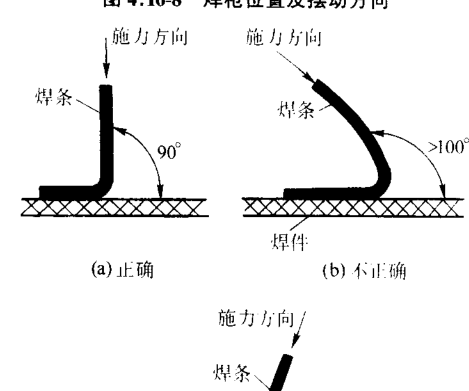
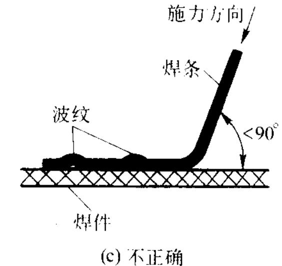


图 4.16-8　焊枪位置及摆动方向



(a) 正确　　(b) 不正确



(c) 不正确

图 4.16-9　塑料热气焊时的焊接角度

塑料的焊接速度比金属焊接慢的多。依塑料厚度和焊条直径的不同，塑料热气焊手工焊接速度约为 50～300 mm/min，焊接速度过快会使焊条和焊件加热不充分，焊接强度低；而速度太慢则会使温度过高，使材料发生分解甚至被烧焦。

采用热气焊焊接塑料时，由于某些原因会造成焊缝的缺陷。表 4.16-7 列出了采用热气焊时可能产生的缺陷名称、产生原因及其防止措施。

影响热气焊焊接质量有如下因素。

1）塑料母材的焊接性。

2）与母材相适应的填充焊料（焊条）。

3）焊缝的形式和焊道数，一般讲，焊道数应少而每道应较厚。

4）焊接条件（温度、速度、压力）。

5）焊前工件和焊条的准备。

6）防止产生裂纹的措施。

7）焊工技术水平。



24

表4.16-7　热气焊时可能产生缺陷的名称、产生原因及其防止措施

序号	焊缝缺陷名称	产生原因	防止措施
1	裂纹	工件装配不当；焊缝冷却过快；操作时填充焊条的角度不当	合理装配工件，避免产生预应力；焊后缓冷；操作时正确填充焊条
2	未焊透	焊接温度太低；焊条添加量太少；操作不当，空气进入焊接接头或焊枪位置不正确	正确掌握焊接温度和焊条添加量，提高操作技术
3	焊穿	焊接温度太高，未及时添加焊条；焊枪位置不当；焊接速度太慢	正确掌握焊接温度，及时添加焊条，掌握好焊枪位置和焊接参数，提高熟练程度
4	夹渣	工件焊前未清理干净，使用不清洁的焊条	焊前仔细清理工件和焊条
5	气孔	工件或焊条焊前清理不干净；空气中有水分；焊缝排列不紧密	焊前仔细清理工件和焊条；空气应过滤后再进入焊枪；焊接时焊缝排列要紧密，不能有空隙
6	焊缝过渡区母材厚度减小	焊接温度太高；焊枪位置不当	提高操作技能，正确控制焊接温度和焊枪位置
7	焊缝高度不够	焊条添加量太少	补焊到焊缝要求的高度
8	母材出现分层现象及凸起	操作过程中因多次加热而过热	正确掌握操作规范，铲除缺陷处，清理表面重新焊接

3.2　热工具焊

利用可控温度的加热工具对两被焊塑料的表面进行加热，直至其表面层充分变软发粘后在压力作用下使二者结合形成具有一定强度焊缝的方法称为热工具焊。热工具焊通常不需要填充焊料，依靠人工或机械产生焊接压力，在个别情况下，也依靠塑料自身的热膨胀产生焊接压力。热工具焊最早在20世纪30年代用于塑料薄膜的连接，现在它是应用最广泛的塑料焊接方法之一。

依据发热工具与塑料焊接面之间不同的相互位置，热工具焊可分为直接式和间接式两种。直接式热工具焊中发热工具直接位于两个对接焊面之间，通过热传导和热辐射直接对塑料表面加热，而间接式热工具焊中发热工具被安装在被焊塑料焊接面的背面，热能不直接加热塑料的焊接面，而必须通过一定厚度的被焊塑料间接地作用于焊接面上。

依据接头形式和加热工具形状（如热板、热锲、热刀等）的不同，可以有多种不同的焊接形式，如图4.16-10所示，它们都属于直接式热工具焊接方法。

1）管对接焊　热板的两个加热面（也称工作面）相互平行地同时对被焊塑料管端面加热，待焊接面上的塑料热熔后，手控或机械控制切换过程和焊接压力，将两个管件压焊成一体（图4.16-10a），从而实现焊接。

2）热工具弯角焊　通过人工或机械作用将锲子形的发热工具压进被焊塑料的表面，使其熔化，形成缺口，然后将塑料扳向缺口方向折弯成角，使呈锲子形的缺口焊接在一起（图4.16-10b）。热工具弯角焊也称为热锲焊。

3）发热锲搭接焊　作为发热工具的热锲位于两个搭接面之间，通过手控或机械控制压轮将搭接面压焊在一起（图4.16-10c）。

4）热工具直角焊　用热板分别对两块被焊塑料的端面和平面加热（图4.16-10d），然后手控或机械控制切换过程和焊接压力，将它们垂直焊接在一起。由于被焊平面上常因热板的压力形成凹槽，所以热工具直角焊又称为热工具槽焊接。

5）热工具割接焊　先将被焊塑料片材叠放在一起，然后用丝形、带形或刀形的发热工具将其切断，断面上的塑料与发热工具的侧表面（加热面）接触融化，从而焊接在一起（图4.16-10e）。焊接过程和切割力一般由机械控制。

热工具焊的质量取决于发热工具的质量及其工作可靠性。发热工具的表面状态是影响焊接质量最直接的因素。发热工具表面必须清洁、阻燃、不与被焊塑料发生反应，并能防止塑料热熔后粘贴在发热工具的表面。发热工具表面通常都涂敷有一层增强聚四氟乙烯膜，也经常采用一些润滑剂，如金属硬脂酸盐，蜡和油，来防止热塑性塑料与热金属板表面的粘连，但由于它们会降低焊接接头的强度，因此并不推荐使用。发热工具表面还必须有足够的热稳定性，使其在加热和冷却频繁交换或环境温度剧烈变化的情况下能稳定工作。另外，热工具的表面温度应能定量确定和精确调节，为了保证发热工具的焊接质量，应该经常测量热工具的真实表面温度，常用的方法有高温计测温法、红外光学热成像方法，熔体表面温度测量方法和色彩贴片方法等。

热工具的切换及焊接压力的控制可以手动操纵，也可以机械操纵，不论使用哪种操纵方式，都必须保证焊接压力均匀分布在整个焊接面上。手动操纵的热工具焊一般只能焊接受力不大的接头，另外，由于手动的作用力有限，焊接的面积也比较小。在机械操纵的热工具焊接过程中，温度、压力、焊接时间和加热时间等参数都可以调节，并能精确地控制热工具的运动。由于机械操纵可以产生较大的焊接压力，所以可以焊接大尺寸工件。机械操纵的热工具焊接包括不连续的焊接操作（如图4.16-10中的a、b、d、e）以及连续性的焊接操作（如图4.16-10c）。在连续性焊接时，滚轮在垂直方向对焊缝施加焊接压力，而滚轮的运动则控制工件进给及焊接速度，只要操作得当，机械操纵的发热工具焊接能保证很高的焊接质量。

热工具焊接塑料制品时，必须根据被焊塑料的种类、被焊工件的几何形状以及焊接接头的受力要求决定具体的焊接方法。不同的发热工具形状决定了不同的焊缝结构。在多数情况下，应预先切削加工焊缝坡口或平面，并在坡口成形后立即进行焊接。切削预加工必须保证两个坡口的对称，坡口面应平整，因为凸凹不平将影响热传导，最终将影响焊接的质量。焊接厚壁工件时，最好能对工件的焊接区及其周围先进行预热，使其温度均匀提高，防止产生内应力和热变形。

依据所采用的热工具的不同，热工具焊有热板焊接、烙铁焊接、热带焊接、热模具焊接、感应焊接等多种形式。

3.2.1　热板焊接

热板焊接所用的加热工具可以采用镀镍或镀铬的钢板和铜板，无镀层的铜和钢会使某些塑料发生分解，所以应该避免使用。玻璃板和铝板在聚乙烯焊接中获得了令人满意的结

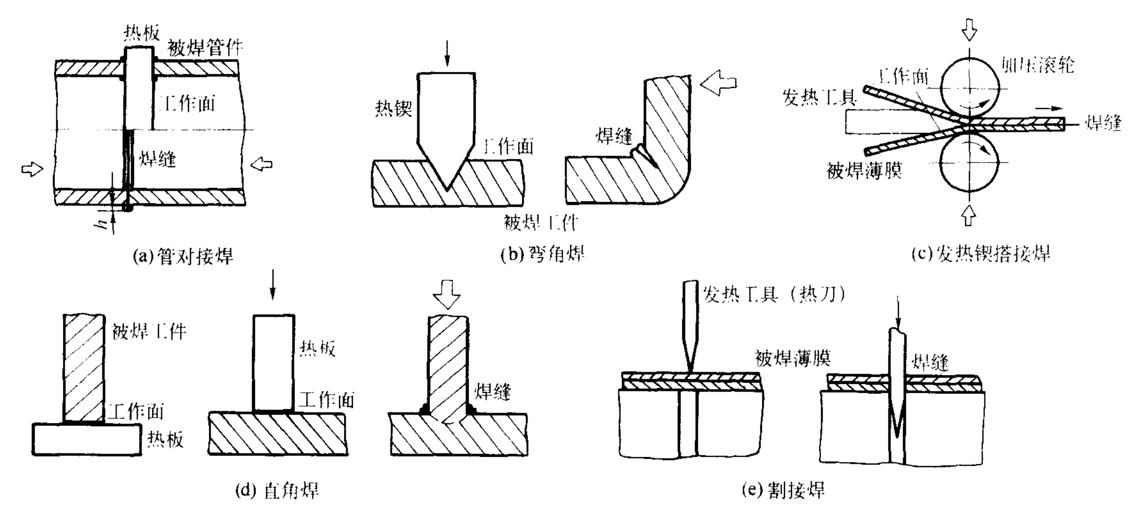


图4.16-10 几种典型的直接式热工具焊接方法

果。热板焊适于板材、管材、型材和模塑件等的对接及用板材制造管件时的焊接，其壁厚一般大于0.8 mm。

两平板的热板对焊如图4.16-11所示，焊接过程包括准备阶段（图4.16-11a），加热周期（图4.16-11b），切换周期（图4.16-11c）和压焊周期（图4.16-11d）四个阶段。加热时间因焊接材料的不同而不同。塑料加热到熔融状态后，须快速撤出发热工具，这就是切换周期。接头强度会随切换时间的增加而降低，所以对切换周期有一定要求。焊接压力在压焊周期里可以变化，但它必须保持到焊接区内的热熔态塑料完全冷却硬化为止，以保证有足够的压力排出气泡和使表面紧密接触，从而形成具有足够强度的焊接接头。

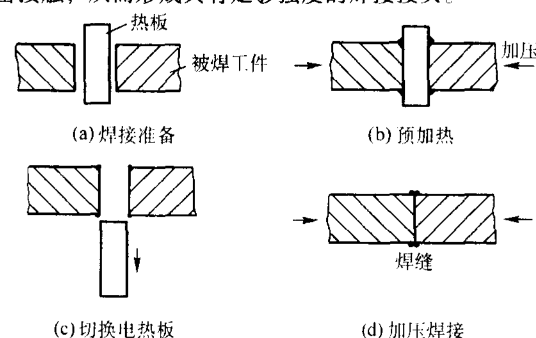


图4.16-11 热板对焊过程示意图

热板焊中，被连接板软化边缘上的压力会形成卷边。试件冷却后，如果不再进行进一步的成形加工，卷边应用砂纸去掉并将该区域磨光，但若焊接板还要进一步加热成形，则应保留卷边，因为成形加工中会形成凹陷。

热板焊接的主要工艺参数有：

加热压力　在加热周期里发热工具表面对塑料表面的作用压力；

加热时间　加热压力作用下塑料表面被加热的时间；

切换时间　加热结束至压焊开始的一段时间，这里包括撤出热具的时间；

焊接压力　作用在两个焊接面上的压力；

焊压时间　保持焊接压力的时间；

热工具温度　发热工具表面的真实温度；

焊接温度　压焊开始瞬时塑料表面上的温度。

热板焊接过程中各主要焊接工艺参数的变化如图4.16-12所示。

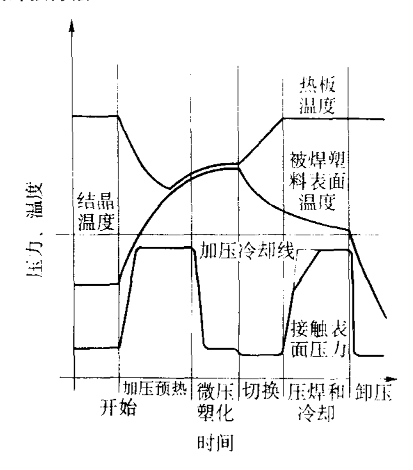


图4.16-12 热板焊接过程中焊接工艺参数的变化示意图

热工具焊接方法非常适合于焊接聚乙烯、聚异丁烯、聚苯乙烯、聚丙烯、氟塑料（聚四氟乙烯）等。表4.16-8为高密度聚乙烯（HDPE）管材热板焊接时的工艺参数范围。如果母材塑料不是管材，也可参照表中的参数焊接。表4.16-9为聚氯乙烯（PVC）的热板焊工艺参数范围。常用塑料热板焊接时的热板加热温度可参考表4.16-10。

表4.16-8 高密度聚乙烯管材的焊接条件

壁厚/mm	预热时卷边高度 h (mm)① 预热温度：(210±10)℃ 预热压力：0.15 MPa	加热时间/s 温度：(210±10)℃ 压力：0.01 MPa	允许最大切换时间/s	焊缝在保压状态下的冷却时间/min 焊接压力：0.15 MPa
2～3.9	0.5	30～40	4	4～5
4.3～6.9	0.5	40～70	5	6～10
7.0～11.4	1.0	70～120	6	10～16
12.2～18.2	1.0	120～170	8	17～24
20.1～25.5	1.5	170～210	10	25～32
28.3～32.3	1.5	210～250	12	33～40

① 卷边高度 h 见图4.16-11a。



表 4.16-9 聚氯乙烯的热板焊接条件

条件 材料	热板温度 /℃	不同壁厚的预热时间/s				预热压力 /MPa	焊接压力 /MPa
		4 mm	10 mm	15 mm	20 mm		
硬聚氯乙烯	250 ± 20	8 ~ 10	15 ~ 16	17 ~ 30	23 ~ 48	3 ~ 5	8 ~ 10
软聚氯乙烯	170 ± 10	4 ~ 10				0.2 ~ 0.8	—

表 4.16-10 常用塑料热板焊接时的热板加热温度

塑 料	焊接加热板温度/℃
ABS	232
聚甲醛	260
聚碳酸酯	343
聚苯乙烯	212
聚苯醚	343
尼龙 66	246
聚丙烯	204

3.2.2 热带焊接

热带焊接多以热惯性小的薄金属带或金属丝作为加热工具，主要用于焊接厚度小于或等于 0.8 mm 的塑料薄膜。热带焊接时发热工具不直接加热塑料的焊接面，因此属于间接热工具焊接方法。热带焊接过程中被焊材料始终处于焊接压力的作用之下。根据发热工具工作周期性的特点，间接式热工具焊分为不连续加热和连续加热两种。

不连续加热的热带焊也称热脉冲焊接，焊接结构如图 4.16-13a 所示。焊接过程中，发热工具中的电加热装置仅在加热周期里接通，焊接压力则在整个焊接过程中始终作用于焊接面上。加热周期的长短取决于发热工具的温度，焊接压力可以手控或者机械操纵。热脉冲焊接的发热工具通常由电加热热带、热带夹持头和隔离套组成，热带夹持头和热带之间依靠阻尼隔热层弹性连接。热带表面涂敷有起保护作用的聚四氟乙烯膜，热带夹持头还具有传力和散热的作用。

连续加热的热带焊又称作热滚轮焊（图 4.16-13b），被焊塑料被连续地引入滚轮系统，通过滚轮系统中的持久加热装置和冷却装置进行焊接。调节滚轮的引入速度和滚轮在塑料工件（薄膜）上垂直方向的位置，可以改变焊接速度和焊接压力。

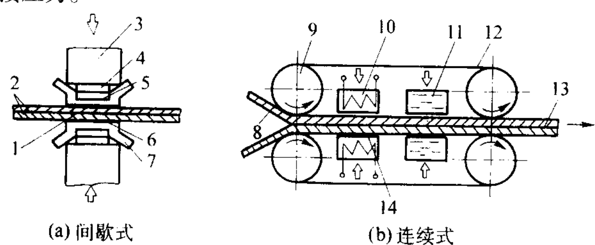


图 4.16-13 热带焊接示意图

1、13—焊缝；2、8—被焊材料；3—热带夹持头；4—弹性隔热层；5—热带；6、14—工作面；7—隔离套；9—滚轮；10—发热元件；11—冷却装置；12—滚轮带

热带式焊接装置几乎都是半机械化、机械化或自动化操纵。焊接接头形式通常为搭接，不需要任何填充焊料。焊接之前，母材毋需作任何预加工处理，但应保证焊接表面的清洁，因为表面氧化或污染会影响焊接的质量。通常焊缝也不必作任何焊后加工处理。最佳焊接参数，如温度、压力等，只能借助预焊试验来确定。

3.2.3 烙铁焊接

烙铁焊接主要用于塑料薄膜间的热合，烙铁焊接主要用手工操作，加工效率较低，但很少受到焊接尺寸和形状的限制。按烙铁对薄膜加热方式的不同，又可分为直接热合和间接热合。

直接热合法烙铁焊接薄膜的操作如图 4.16-14 所示，焊接时先将烙铁前端附加的热片加热到预定温度，然后将热片置于两薄膜间将其加热至变软发黏状态，匀速移动烙铁并用手辊将加热处紧压在一起，即可实现两薄膜件间的连接。

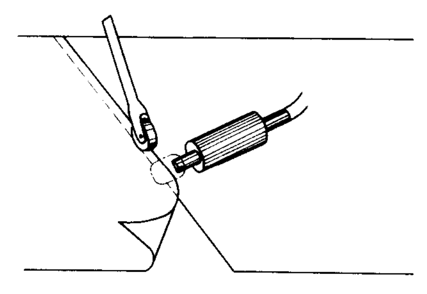


图 4.16-14 烙铁焊接示意图

间接热合法烙铁焊接的操作与直接热合法大致相同，只是烙铁的附加热片不直接与薄膜的结合面接触，而是隔着耐热薄片向结合面处传热。常用的耐热薄片是氟塑料膜、涤纶膜和薄云母片等。这种热合方法由于热片不与薄膜直接接触，不会引起热敏感性塑料膜的过热分解，因而有利于扩大烙铁焊接对于塑料品种的适用范围。

3.2.4 热模具焊接

热模具是一种加热面的形状和尺寸与待焊件结合面相吻合的特种加热工具，主要用于非平面状结合面的焊接。最常见的热模具焊接，是管件的套插连接。用于套插连接的热模具，既有加热插管的阴模，也有加热套管的阳模，用这种模具同时加热插管和套管的情况如图 4.16-15 所示。插管和套管的结合面在热模具上加热一定时间后，将模具撤离并迅速将插管放进套管中，再经过适当的冷却即可形成牢固的套插接缝。

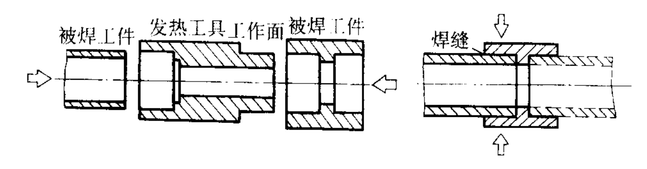


图 4.16-15 热模具管件套接示意图

3.2.5 特殊形式的热工具焊

（1）红外线加热焊接

该方法采用红外线辐射能量对塑料表面进行加热，在焊接表面变软发黏后，停止加热并在压力下将两个被焊件连接起来。红外线射线由高亮度的石英加热灯提供，产生波长为 1 μm 左右的射线，可以很快地穿透聚合物并形成熔化区。红外线加热过程由于不存在热传导，所以也不必施加预热压力。因为加热过程中零件不与热源接触，避免了与热源粘连，所以红外加热特别适合于高熔点的聚合物。需要注意的是，塑料成分只要有很小的变动，就会使红外加热的穿透深度发生很大的变化，所以在红外加热过程中，应严格控制塑料成分，使其保持一致。

（2）注入焊接

注入法焊接中，丝或带状的加热工具被置于被焊件的连接表面处，在焊接过程中提供令塑料表面熔化的能量，而在焊接完成后留在焊接塑料件中作为试件的一个组成部分。典型的金属插件包括冲压制成的金属薄片，不同形状的导电金属丝，以及金属丝制成的筛子等。金属插件可以采用通电流或磁感应的方式进行加热，分别被称为电阻注入焊接和感应

焊接。

1）电阻注入焊接 电阻注入法使用电阻丝作为内藏的热源置于焊接面处，在接通外部电源后发热，使塑料熔融实现焊接。图4.16-16为利用嵌入电热丝实现管件套接的示意图。管端部切成方形，然后推入内置电热丝与一内部侧翼相接。接着将电热丝与外部导线相连。利用定时装置控制不同尺寸管道所需的热量。焊接完成后，将线头剪掉，形成接头。焊接过程中，可以利用焊管自身的热胀（4.16-16a），或是外加的径向收缩力产生焊接压力（4.16-16b）。焊接完成后，电热丝将留在焊缝中。

电阻注入法制造的接头具有良好的抗化学腐蚀性及抗弯曲和疲劳性能，在高真空系统中表现优良。加热器件完全被封在塑料构件中，因此不会与管道所输送的液体相接触。加热装置的大小在一定范围内可以改变，而且可以在任何位置进行安装，不受操作空间的限制。

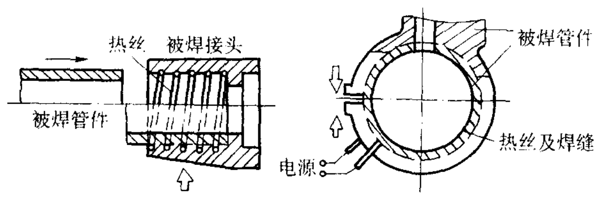


图4.16-16 嵌入电热丝法进行管件套接示意图

2）感应焊接 利用磁感应方式进行焊接时，安置在焊接面处的导电材料受高频磁场作用，在导电材料内部产生涡流，材料对这些涡流的电阻产生热量，利用这些热量对塑料焊接面进行加热并在一定压力作用下将塑料件连接起来。在大多数的感应焊接中，将填充有氧化铁或金属颗粒的带状、条状或片状的热塑性塑料放置在焊接层处作为生热材料。感应焊接不受塑料成分或形状的限制，同时加热速度快，有些操作只需不到1秒的焊接时间，其加工速度仅受到工件装配和夹具移开速度的限制。感应加热设备的成本较高，因此仅限于小尺寸零件的焊接。

感应焊接由于只在紧邻金属插件的区域形成焊缝，所以接头强度较低。较长的焊接时间能使更多的材料熔化，因此可以获得更牢固的接头，但焊接时间过长会导致塑料过热而性能退化。较高的压力下塑料通常可以承受更多的热，防止塑料的退化。压力水平受被焊材料强度和刚度的限制，同时要避免将熔化材料挤出。在设计被焊接部件时，应使压力均匀分布在金属插入件上。为有效传递能量，在满足定位和夹持要求的前提下，金属插件应尽可能靠近感应发生器线圈。任何时候，插件都必须置于两被连接的塑料表面之间，使其不暴露在空气之中，否则插件会产生快速的加热而使塑料发生分解。尽管感应焊接所得接头的强度不如其他焊接方法，但对于很多应用场合是能够满足要求的，如用金属筛形插件焊接聚乙烯板，所得焊缝强度大于母材强度的50%。

热工具焊接的质量主要取决于以下因素。

① 母材塑料的焊接性。

② 根据被焊母材和对接头的使用要求选择最适宜的焊接方法。

③ 正确选择接头形式。

④ 接头坡口及焊后加工的质量。

⑤ 加热的方式（电、气、磁等）。

⑥ 发热工具的表面质量和清洁度。

⑦ 焊接工艺参数的选择、加热工具表面温度的精确调节与控制以及正确的焊接操作。

3.3 挤塑焊

挤塑焊中，塑料填料先经塑化装置（挤出机）均匀混合并充分熔化，然后被挤压到加热至一定温度的焊接表面上，最后在一定的压力作用下凝固，将两被焊件连接起来。挤塑焊适用于很长的表面、厚壁工件及大面积贴面的焊接，其典型应用领域包括厚壁容器、化工设备、管道工程以及建筑结构中的密封、矿山建筑中的表面封焊等，也包括一些其他具有类似特点的构件。

挤塑焊机中焊料的塑化与输送可采取柱塞式或螺杆式挤出机，填充焊料的形式可以是粒料或线料，焊接压力可以采用手工压头、压靴或滚轮加压装置来提供，焊接表面可采用热气或光致热能来进行预热，由于各个环节上所采用方法的差异，挤塑焊有多种不同的方式。一种手提式挤塑焊机的结构如图4.16-17所示，它采用一台小型螺杆挤出机作为塑化装置，用一台手提电转马达驱动，焊机上还集成了一台通用型热风机，由外部气源供气。与焊缝形式相匹配的压靴（即焊靴）装在焊料挤出口上，利用焊机自重和焊工的压紧力向焊缝施加焊接压力。焊接操作时，热气喷口排出的气体将被焊表面加热至焊接温度，焊工手持焊机，将塑化的填充焊料挤压进焊缝，填充焊料反作用于焊机端部的压靴，推动焊机向焊接进给方向移动。

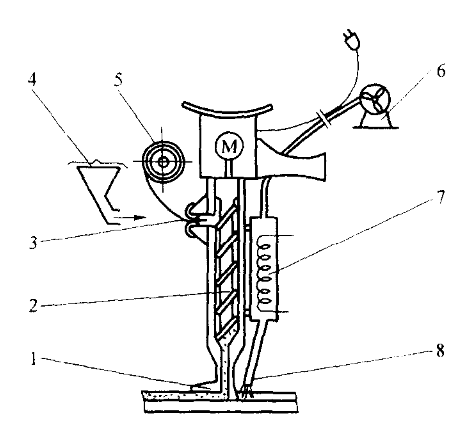


图4.16-17 挤塑焊方法示意

1—焊靴；2—挤出机；3—线料进给装置；4—粒料；5—线料；6—供气源；7—热风机；8—热气喷口

目前，挤塑焊方法主要用于焊接聚乙烯和聚丙烯塑料。挤塑焊的填充焊料应与母材一致，禁用成分不明的材料和再造的各类材料。挤塑焊中的填料，不论粒料还是线料，都必须干燥清洁，其中对线料还应有形状精度和气孔率等方面的要求。

挤塑焊的焊接接头原则与热气焊焊接接头的原则相同，但由于挤塑焊的体积容量较大，所以挤塑焊的焊缝多为单焊道。焊道在坡口两侧的搭接宽度约为3 mm（图4.16-18）。根据被焊板材厚度的不同，V形对接接头的坡口角度 θ 一般在45°～90°之间，坡口宽度 b 一般限制在30 mm之内，否则，将会由于焊工手执力有限而不能保证足够的焊接压力。为了保证预热的功率和焊透性，坡口底边常见的根部间隙 a 为2 mm（参见图4.16-18）。如果根部间隙必须大于2 mm，则推荐改用图4.16-19的X形对接接头形式。

直角挤塑焊常见的接头形式为如图4.16-20所示的T形接头，其中图4.16-20a为单边V形坡口，而图4.16-20b为双边V形坡口的T形接头。图中垂直板与水平板的边缘之间留有10 mm的边长（g），以便挤塑焊枪或挤塑焊头能够借以支撑。



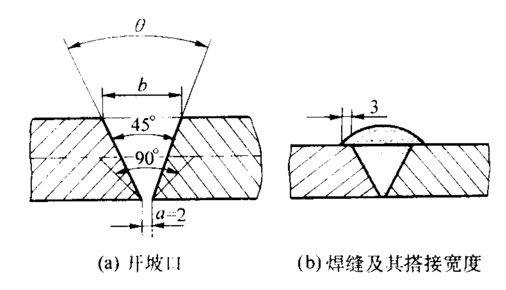


图 4.16-18　挤塑焊 V 形坡口对接接头及搭接宽度

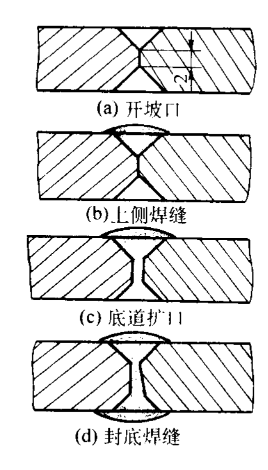


图 4.16-19　挤塑焊 X 形坡口对接接头

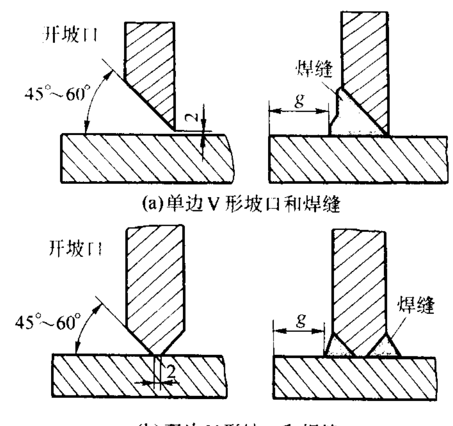


图 4.16-20　挤塑焊 T 形接头

管道或者板材、片材等的挤塑焊搭接接头形式见图 4.16-21，其中图 4.16-21a 中标出的缝隙量 d 是为了保证足够的预热效果和焊透性，根据管壁厚度的不同，一般取 $d \geqslant 1$ mm。

挤塑焊的焊接表面必须清洁，不被污染。焊接前，必须对焊接表面的区域用刮刀削去表面层（如表面老化层、表面氧化层或表面腐蚀层等），直至露出清洁的母材（图 4.16-22）。

影响挤塑焊焊接质量的因素如下。

1）塑料母材的焊接性。

2）与母材一致的填充焊料。

3）焊缝的接头形式。

4）焊接条件（焊料塑化温度、表面预热温度、焊接速度、焊接压力）。

5）焊前工件和焊料的准备。

6）焊工技术水平。

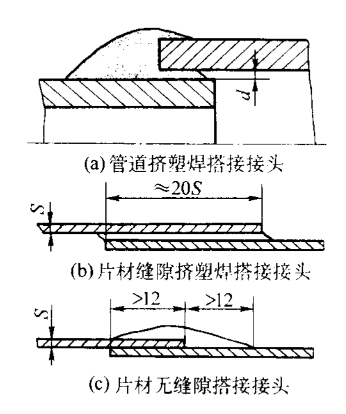


图 4.16-21　管道和片材的搭接接头形式

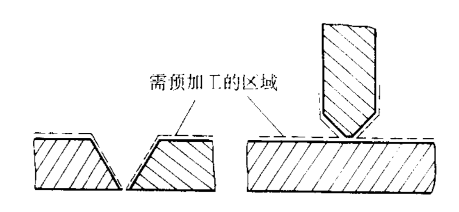


图 4.16-22　挤塑焊接头坡口表面的预加工区

3.4　超声波焊

塑料超声波焊接的原理是塑料的焊接面在超声波能量的作用下作高频机械振动而发热熔化，同时施加焊接压力，从而把塑料焊接在一起。超声波焊机一般有超声波发生器、焊压台和焊具三大部分组成（图 4.16-23）。其中，焊具包括超声波换能器、调幅器、超声波振极（又称超声波振头）和底座。用于塑料焊接的超声振动频率一般在 20 ~ 40 kHz。超声波焊机可以半机械化、全机械化或自动化地进行操作。超声波焊接可以间歇地或连续地进行。

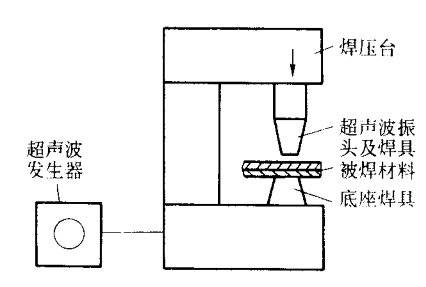


图 4.16-23　超声波焊机示意图

根据焊具与工件相互位置不同，超声波焊接分为近程和远程两种。前者又称为直接式超声波焊接，或接触超声波焊接；而后者称为间接超声波焊接。

1）近程超声波焊接　超声波振头和塑料焊接面之间的相互作用距离很近（小于 6 mm），与振头端面接触的整个塑料焊接面都发生热熔化，从而实现焊接。

2）远程超声波焊接　超声波振头和塑料焊接面之间的作用距离较远（大于 6 mm），超声波能量必须经过被焊工件传递至焊接面，并仅在焊接面上产生机械振动，从而发热熔化实现焊接，而位于超声波振头和焊接面之间起传能作用的工件本身，并不发热。

超声波对塑料件的可焊性与塑料材料本身的熔融温度、弹性模量、摩擦系数和导热性等物理性能有关，大部分热塑性塑料能够通过超声波进行焊接。一般而言，硬质热塑性塑



料的焊接性能比软质的好，非结晶性塑料的焊接性能比结晶性的好（参见表4.16-11）。所以焊接结晶性塑料和软质塑料时，需要在离振头较近的近场区焊接。超声波焊主要用于焊接模塑件、薄膜、板材和线材等，在焊接时不需加热或添加任何溶剂和黏结剂。

表4.16-11　热塑性塑料的超声波焊

材料名称		焊接性能	
		近程焊接	远程焊接
非结晶性塑料	ABS	优良	良好
	ABS/聚碳酸酯合金	优良－良好	良好
	聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）	良好	良好～一般
	丙烯酸系多元共聚物	良好	良好～一般
	丁二烯－苯乙烯	良好	一般
	聚苯乙烯	优良	优良
	橡胶改性聚苯乙烯	良好	良好～一般
	纤维素	一般	差
	硬质PVC	一般	差
	聚碳酸酯	良好	良好
	聚苯醚	良好	良好
结晶性塑料	聚甲醛	良好	一般
	聚酰胺	良好	一般
	热塑性聚酯	良好	一般
	聚丙烯	一般	一般～差
	聚乙烯	一般	差
	聚苯硫醚	良好	一般

塑料超声波焊接的焊接面预加工有一些特殊的要求，在焊接面上，常设计有带尖边的超声波能量定向唇，又称导能筋（图4.16-24）。超声波能量定向唇具有以下作用。

1）减小超声波焊接的起始接触面积，以达到较理想的起始加热状态。

2）准确地控制材料熔化后的流动。

3）防止工件自身过热。

焊接模塑件时，超声波能量定向唇的形式及其设计原则取决于被焊塑料的种类和模塑件的几何形状。除图4.16-24的典型要求外，图4.16-25给出了无定形（图4.16-25a）和部分结晶塑料（图4.16-25b）超声波焊接时焊接面设计的一些例子。

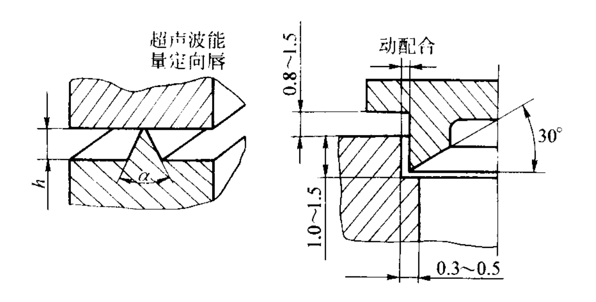


图4.16-24　塑料超声波焊接面上的超声波能量定向唇

塑料超声波焊接的焊缝质量受以下几个因素的影响。

1）母材的焊接性能。

2）被焊工件的几何形状和公差范围。

3）焊缝设计的几何形状和公差范围。

4）焊具（超声波振头）的几何形状和公差范围。

5）焊接参数如焊接压力、焊接功率（振幅）、焊接时间、冷却时间以及焊具压入深度等的调整和稳定控制。

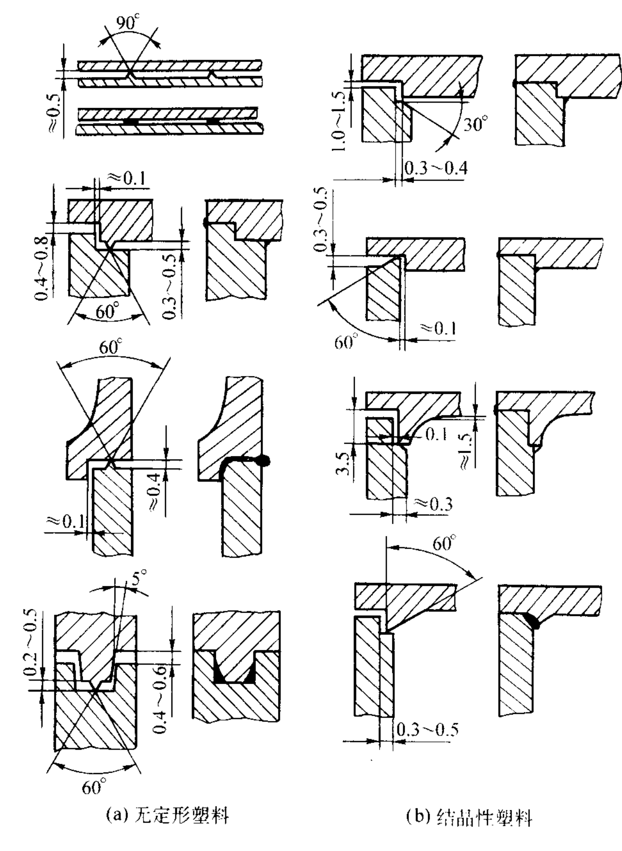


图4.16-25　塑料超声波焊接的焊接面预加工设计举例

3.5　摩擦焊

塑料摩擦焊的原理是利用两被连接塑料表面相互摩擦所产生的热量使焊接面熔化，同时施加焊接压力，把它们焊接在一起。摩擦热通过两个被焊接材料之间的相对运动产生，相互运动的方式可以是振动或旋转，英国焊接研究所（TWI）还开发了搅拌摩擦焊接方法。旋转摩擦通常更为方便，常用的方法是旋转被连接件之一，另一个保持静止，如图4.16-26所示。一般情况下，摩擦焊不需要填充焊料，但有时也使用与被焊塑料相同的中间摩擦件作为填充焊料进行焊接。除了专用的塑料摩擦焊机床外，通用的车床、钻床和铣床等，也能改装用于塑料的摩擦焊。

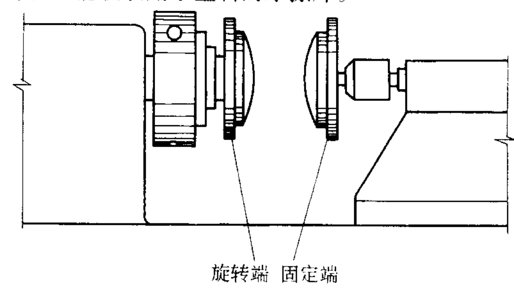


图4.16-26　摩擦焊装置示意图

摩擦焊的主要优点是焊接速度快，操作简单。由于摩擦生热剧烈而热塑性塑料导热性差，所以在很短时间内就能达到足够高的温度使表面发生熔化焊接在一起，而紧邻焊缝的材料温度基本保持不变。由于生成的热量集中，塑料摩擦焊可以在液体环境中完成，而且通过合理的接头设计，利用摩擦焊接方法可以实现热塑性和热固性材料的连接。摩擦焊中消除了试件表面上的空气，因此避免了塑料的氧化，这一点在焊接对氧敏感的材料（如尼龙）时十分有利。摩擦焊的不



足是只适用于比较简单的几何外形，最常见的是圆柱形接头；其次是会生成飞边，为了保证焊接质量，飞边在一定程度上是必要的，通常在焊接完成之后将焊缝上的飞边用车加工去除。

摩擦焊的预处理包括机械加工焊接面和清洁处理，切削加工后的表面必须清洁，不沾切屑、油污等杂质。摩擦焊的主要焊接参数如下。

① 加热压力　两个工件相互旋转时接触面上的压力。

② 加热时间　加热压力作用的时间。

③ 焊接压力　焊接面达到焊接温度后所施加的压力。

④ 压焊时间　焊接压力保持的时间。

摩擦焊中的压力可以通过螺旋进给或气动进给装置来施加和控制。压力应足够高以消除接头处由于污染或材料降解而可能形成的气泡。材料初始熔化后应稍增加压力，以使熔化材料在凝固前从接头处挤出。较高温度下需要更高的压力，以阻止某些塑料（特别是丙烯酸树脂）的降解及气泡的形成。大多数焊接操作的压力在 $7\times10^4\sim140\times10^4$ Pa 的范围内。为避免过热，焊接时间不能太长，只要保证被焊接面完全熔化即可。较短的焊接时间可以减小飞边和内部应力。对焊接过程的控制可通过控制轴的位置和焊接时间来实现。控制轴的位置可以保证在每个焊接循环内给定量的材料熔化，可以用几种方式来实现，一般在自动进给装置上安装一个限位开关和自动分离的装置。加热的停止可以通过切断轴驱动器实现。

热塑性塑料的性能（如摩擦系数和热导率）以及摩擦表面的相对速度，对于摩擦表面的生热量具有决定性作用。旋转圆柱的表面速度是圆柱直径和每分钟转速（r/min）的函数。对于实心圆柱，表面上各点的平均速度是圆周速度的 2/3。对于中空的圆管，平均点速度可按照式（4.16-1）计算：

$$v=\frac{2}{3}W\left(\frac{r_o^3-r_i^3}{r_o^2-r_i^2}\right) \tag{4.16-1}$$

式中，W 为角速度，r/s；v 为平均点速度，m/s；r_o 为外径；r_i 为内径。

高的表面速度可以产生更多的摩擦热，从而可以减少焊接时间。高转速在连接圆管时还有利于熔化材料的离心流动，促进离心飞边的形成，使外部飞边增加内部飞边减小。但过高的速度会引起试件振动和被连接表面的偏心接触，因此受到一定限制。表面速度低会导致试件表面之间的相互碾磨和剪切，而不是所期望的相互摩擦，所以不宜使用。焊接过程中，一旦被连接表面充分熔化并开始施加压力，表面间的相对摩擦必须停止，如果由于减速太慢而使熔化材料在相对运动停止以前凝固，焊缝会受剪切作用而损坏，摩擦焊过程中静止工件的制动和脱开如图 4.16-27 所示。

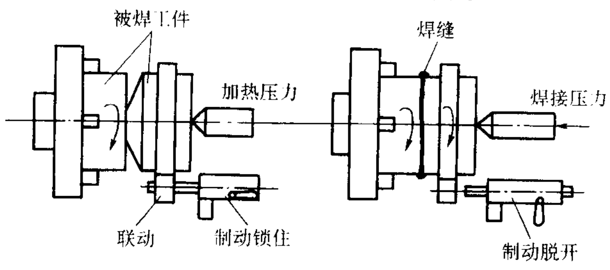


图 4.16-27　摩擦焊过程中静止工件的制动和脱开

焊接表面上不同的表面速度导致焊接过程中不同的温度和冷却后塑料焊接接头中的残余应力。焊缝中部残余应力最大，外表面处最小。如果更多的高应力表面暴露于致裂和致脆的环境下，就会导致严重的应力开裂，此时需要进行退火消除残余应力。因为圆管内、外径处的圆周速度差别很小，所以摩擦焊对于管的连接更为理想。

焊接速度和焊接压力对于焊接热的生成具有基本相同的影响规律，过快的焊接速度和过高的焊接压力都会导致塑料炭化。几种塑料摩擦焊时，相对速度和压力的建议范围列于表 4.16-12 中。

表 4.16-12　焊接参数建议范围

材　料	平均速度/$m\cdot s^{-1}$	初始压力/kPa
尼龙	1.5～15.0	170～1 000
聚甲醛	1.5～10.0	170～1 000
有机玻璃	3.0～10.0	100～850
聚乙烯	1.5～18.0	70～700

合理的接头设计是摩擦焊成败的关键。正确的接头设计应使焊接面积最大而表面上的速度差最小。表 4.16-13 列出了空心和实心工件摩擦焊接时推荐使用的几种接头设计。采用台阶式、榫槽式和锥形接头可以增加焊接面积。焊接面积的增大受管壁厚度的限制，同时它也会导致焊接时摩擦阻力的增加。可以通过去除焊接区的中心部分（该处表面速度接近于零）来减小表面上的速度差，此时即使不增加焊接面积来补偿中部的材料损失，焊缝的强度也可以得到增加。在焊接实心部件时，可以通过在焊件中部加工凸面来补偿速度差的影响，凸面会在焊接中首先熔化。锥面或榫槽型的接头，不仅可以提供更多的接触表面，对于薄件而言还可以实现理想的定位并减小试件在焊接过程中的振动。

表 4.16-13　塑料摩擦焊的接头设计

试件类型	名　称	接头设计	特　点
管接头	榫槽结构		伸出长度 B 大于凹槽深度 A；宽度 C 尽可能大；A 与 B 间为滑动配合
	锥形接头		中点 B 的半径大于中点 A 的半径；材料 Ⅰ 和材料 Ⅱ 具有不同的熔点，用以控制飞边的流向
	台阶形接头		A 与 B 间为滑动配合；A 与 B 的长度用来控制初始的飞边方向；最长的台阶其宽度也最大
	锥槽结构		坡口角度 A 略大于 B；B 上有小伸出长度 C；舌榫宽度尽可能大

续表 4.16-13

试件类型	名 称	接 头 设 计	特 点
实心接头	板状插头		圆盘半径 *B* 略大于孔半径 *A*；驱动棒 *C* 在焊接完成后去掉
	速度补偿		Ⅰ. 端部凸出；Ⅱ. 中心开槽；Ⅲ. 对面件中心开槽
	悬臂接头		Ⅰ. 伸出长度 *A* 大于辅助连接件深度 *B*；Ⅱ. 角 *B* 大于角 *A*；Ⅲ. 锥形接头与对面开槽相结合
	飞边槽		Ⅰ. 开内部飞边槽；Ⅱ. 连接面增加

尽管飞边的出现是焊接成功的表现，但从外观角度考虑并不希望它存在。控制焊接参数可以影响飞边的形成，但在高转速和高压力下，熔化金属的形成和变形很快，因此控制比较困难。可以通过改进接头设计来减小飞边或将飞边埋入内部凹槽内，图 4.16-28 为一种圆形接头的设计，其中切除了管角以容纳飞边。

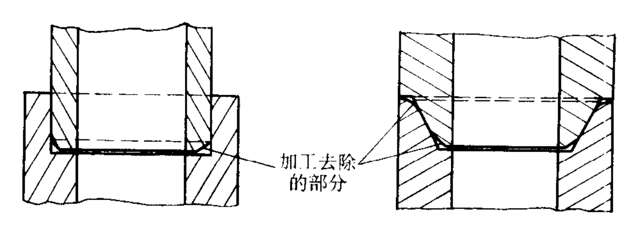


图 4.16-28 圆形接头摩擦焊设计

影响塑料摩擦焊质量的主要因素有：母材的焊接性能；焊缝的形式；焊缝的预加工处理；焊接参数（相对线速度、加热压力、加热时间、切换速度、焊接压力、压焊时间）的正确控制。

3.6 振动焊

振动焊依靠两热塑性塑料在压力和适当的频率与振幅下一起相互摩擦，直至产生足够的热量使塑料熔融和混合，振动停止后校正好零件使熔融态的塑料凝固形成焊接接头。振动焊接中，两工件间的相对运动方式可以是线性的，称为线性振动焊；也可以沿着一定轨道相互运动，称为轨道振动焊。除了两工件的相对运动方式不是旋转外，振动焊与摩擦焊类似。

振动焊能够形成高强度和气密性良好的塑料焊接接头，焊缝强度接近于母材，透明材料的振动焊接仍然能够保持光学透明。此外，振动焊还具有焊缝无过热、杂质少等优点。振动焊比热气焊、热工具焊等方法的焊接速度快，而且还能用来焊接用其他方法不能实现的大型零件的焊接，因此振动焊在中型和大型塑料零件的焊接中居于主导地位。但与超声波焊比，振动焊的焊接时间长、设备成本高，所以在两种方法都可行的条件下，优先选择超声波焊。目前，振动焊在汽车、电子器件、医用设备和家用电器的制造中都有应用。

线性振动焊过程如图 4.16-29 所示，在焊接循环过程中，下方零件上升至与上方零件相互接触，在预置压力（1～4 MPa）下挤压在一起。上电极安装在一个共振弹簧部件上，通过液压或电磁驱动的传动装置来产生振动，振动焊振幅通常为 0.07 mm 到几毫米，频率范围为 100～500 Hz。共振弹簧可以承受施加的压力，并在塑料凝固之前对零件进行精确定位。

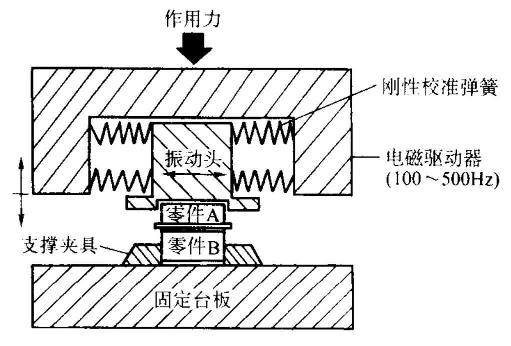


图 4.16-29 线性振动焊示意图

振动焊中的熔深定义为由于界面处的软化和流动导致的被焊零件之间距离的减少。根据熔深与时间的关系，振动焊接过程可以分为 4 个阶段，如图 4.16-30 所示。振动焊中，静态载荷作用于移动零件，因而也作用于熔融层，促进了熔融层的流动。

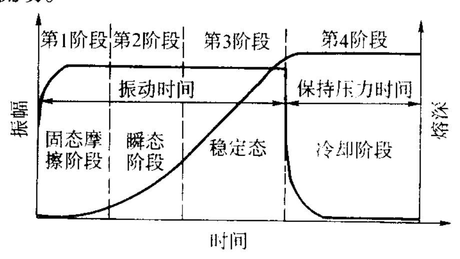


图 4.16-30 振动焊过程的四个阶段

1）固态摩擦阶段　这一阶段，在两固体表面之间摩擦生热，直到在界面处开始形成一薄层熔融层。

2）瞬态阶段　界面上薄层熔融状态塑料的厚度由于粘滞加热逐渐增加，生热率随着粘滞层厚度增加而减小，因此振动焊中不存在过热问题。

3）稳态阶段　在该阶段，塑料熔融速度与流出速度相同，工件之间熔融层厚度不再增加而熔深随时间线性增加。适当控制此时的焊接压力，可使更多的熔融材料保留在界面处，因此能形成更宽的焊缝区。

4）冷却阶段　振动焊的最后阶段，熔融的塑料在压力下凝固，形成焊接接头。

振动焊接主要用于大多数的非结晶性和半结晶性的聚合

物，特别适用于焊接采用超声波焊接不易实现的结晶性热塑性塑料如聚乙烯、尼龙和聚丙烯。各种塑料振动焊接的难易程度列于表 4.16-14 中。

表 4.16-14　各种塑料的振动焊难易程度

材　　料	线性振动焊	轨道振动焊
ABS	最容易	最容易
丙烯酸	最容易	最容易
聚苯乙烯	容易	容易
纤维素塑料	中等	中等
尼龙	容易	容易
聚碳酸酯	中等	中等
聚醚酰亚胺	中等	中等
聚乙烯	难	难
聚丙烯	容易	容易

为了提高焊接质量，焊前应对焊接表面进行必要的处理，使表面光滑。如果表面粗糙，表面上的材料会在振动过程中脱离工件并在界面上滚动，因而降低摩擦力和发热量。一定数量的飞溅可以使母材表面的杂质从焊缝处脱离出去，因此是允许的，但过量的飞溅会有损焊缝美观，应予以避免。一般而言，振幅越大，形成的飞溅数量越多。

影响振动焊接质量的主要因素有：母材的焊接性能；焊缝的预加工处理；焊接参数（相对速度、加热压力、加热时间、焊接压力、压焊时间）的正确控制。

3.7　高频电焊

高频电焊是将被焊塑料置于两电极之间，使其在高频交变电场和焊接压力的共同作用下发热熔化，进而焊接在一起（图 4.16-31）。高频加热属于非传导型加热方式，高频电场穿过接头区，使整个横截面上的分子运动加速，不管材料热导率如何，都能使温度均匀升高，因此高频电焊主要应用于导电性和导热性差的材料。

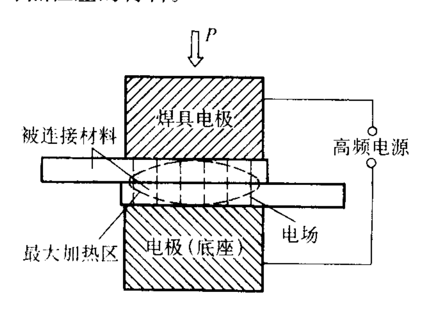


图 4.16-31　高频电焊示意图

高频加热的原理是将电能转化为热能。材料中的分子受到极性高速改变（每秒几百万次）的电场所产生的循环应力的作用，使材料在很短时间内被均匀加热。由于能量转化发生在整个被加热的材料中，所以能量损失和温度梯度被减至最小。高频焊接的主要优点就是加热速度快，焊接时间短，如 2.0 mm 的 PVC 板能在 5 s 内完成焊接；另外消除了大温度梯度，减小了过度加热可能导致的材料分解。

高频加热中生成的热量与所施加的高频能量成正比。施加高频能量的电压和频率与材料的波形系数和损耗系数有关。因为只有较大电介质损耗系数的材料才能把电场中的高频交变电流转变为足以进行焊接的热能，所以，只有那些电介质损耗系数等于或者大于 0.01（测量温度 20℃、测量频率 1 MHz）的热塑性塑料才适于高频电焊。表 4.16-15 列出了不同材料对高频加热的适用性，由表可见，大部分塑料能够在适中的电压和频率下实现焊接。高频电焊主要用于聚氯乙烯（PVC）、软聚氯乙烯、聚氯乙烯的共混物、聚酰胺（PA）和有机玻璃（PMMA）的膜材、片材或板材的焊接。

表 4.16-15　不同材料的高频加热性能

材　　料	很好	好	差	无效
醋酸纤维		×		
丁酸盐		×		
环氧树脂		×		
三聚氰胺甲醛树脂		×		
尼龙		×		
树脂玻璃		×		
聚酯树脂		×		
聚乙烯				×
聚苯乙烯，苯乙烯				×
聚氨基甲酸酯泡沫		×		
多乙酸乙烯酯		×		
聚氯乙烯	×			
间苯二酚甲醛树脂		×		
橡胶	×			
纱纶	×			
硅树脂			×	
聚四氯乙烯			×	
脲醛塑料		×		
乙烯基膜	×			
乙烯基泡沫	×			

尽管高频焊不适用于一些电介质损耗系数较小的材料（如聚乙烯和聚苯乙烯），但通过对高频加热设备进行适当的改装，也可以实现功耗因数小的材料的焊接。将高电介质损耗系数的材料覆盖在电极上，此时覆层材料在高频电场作用下通过非传导方式产生热量，然后热量被传导至要连接的聚乙烯中。要求覆层材料在 120℃ 下应没有太大的变形，玻璃纸、纤维素、醋酸纤维以及一些乙烯基材料等都是合适的覆层材料，覆层材料的最佳厚度在 0.05 ~ 0.15 mm 范围内。

高频电场加热的塑料，由于表面有热辐射，所以中心温度比表面温度高。金属电极和塑料外表面的温度相对较低，所以即使被连接塑料件之间的界面上已达到熔化温度，材料也不会被挤出去。

常见的塑料高频电焊焊接接头形式见图 4.16-32。焊接前，母材不必作特殊预加工，焊接完成后可以根据需要剪裁处理接头的形状。

高频电焊机通常由高频电源、焊具和焊座三部分组成。焊具和焊座的工作面相互平行，构成交变电场的两个电极，高频电焊中，为了获得均匀的温度分布，电极的合理设计十分重要。图 4.16-33 给出了几种不同应用场合的典型的电极构造。电极也可以根据被焊工件的形状制成其他形式。高频电源的工作频率一般为 27 MHz 或 120 MHz ± 0.6%。



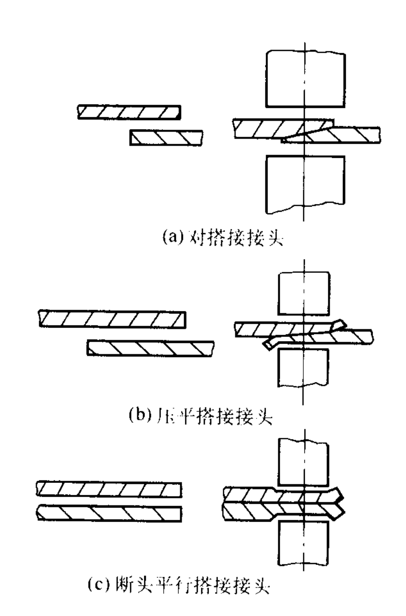


图 4.16-32　塑料高频电焊的接头形式

焊接压力的操纵用手控或机械控制均可。在大多数情况下，焊接压力在整个焊接过程中（包括在冷却周期里）恒定不变，但具有切刀装置的焊具电极例外。在这种情况下，压紧力在焊接过程中需要变化。焊接时、电极压入材料的深度，常由一个限动装置控制。

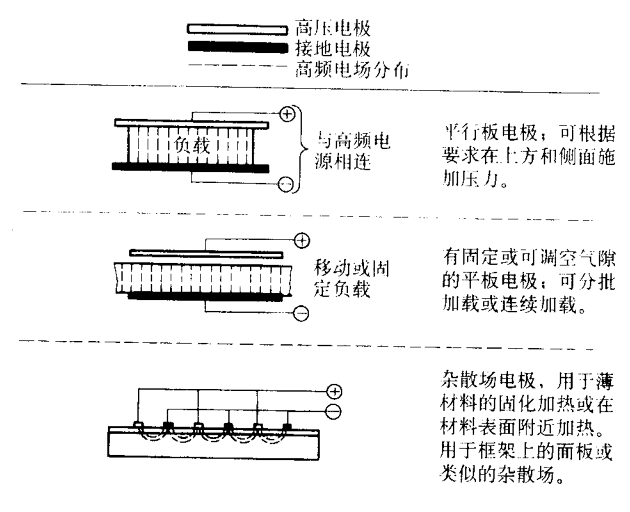


图 4.16-33　高频焊中几种典型的电极构造

塑料的击穿电压通常不超过几百伏，所以高频电焊时不能采用太高的电压。最大焊接速度一定程度上取决于所供热量和材料熔化所需热量及热损失之间的平衡。同时，还必须考虑塑料在压力下凝固所需要的时间。在很高的焊接速度下，尽管热输入量足够，但由于凝固时间不够，焊接质量经常并不理想。一般而言，在短时间，小压力，高热输入（但不能太高）和具有合理边缘半径的电极的条件下，能够得到最优的焊缝。电极的边缘半径尤为重要，因为尖锐的边缘会导致高频场的集中，并由于边缘效应在焊缝侧发生过热现象，如图 4.16-34 所示。图 4.16-34a 所示电极由于半径不同，在上电极处会产生更多的热量，图 4.16-34b 所示电极则由于半径相同，边缘场不明显，因此可以在上下两电极边缘处产生均匀的加热。高频电焊可以使用填充焊料，但一般不使用。

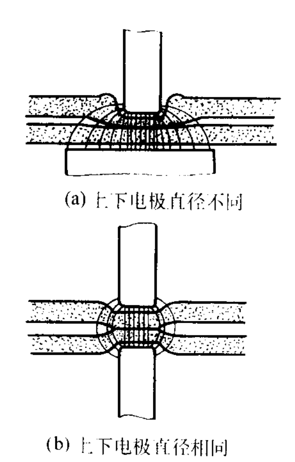


图 4.16-34　高频电焊中电极边缘处的边缘效应

影响高频电焊焊接质量的主要因素有：

1）母材的焊接性；

2）两块电极端面之间的相互平行度及焊具运动的控制；

3）焊接参数：焊接压力、焊接功率、电场强度、焊接时间、冷却时间、电极压入深度等的调整和恒值控制；

4）焊缝宽与焊具壁厚之比；

5）母材表面的清洁度。

3.8　激光焊

在塑料的激光焊接中，利用一束激光对被焊塑料进行加热，使其局部受热发生熔化，同时在塑料热膨胀所产生的压力下在两工件之间形成焊缝。激光焊中被焊工件不与热源接触，是一种非接触式焊接方法，同时在塑料的激光焊接中也不需要使用外加压力。

激光被反射、透射或吸收的程度取决于激光的波长以及材料的表面状态，只有吸收一定量的辐射能才能使其转化为热能并使材料表面熔化。CO_2 激光（波长 $\lambda = 10.6\ \mu m$）处于大多数聚合物不透光的范围内，因此可以实现焊接；而 YAG 激光（波长 $\lambda = 1.06\ \mu m$）对大多数聚合物来说是透光的，因此需要采用适当的添加材料以增强吸收效果，才可以实现焊接。通常可以将一些增加吸收性的材料，如碳化硅颗粒、色素、涂料、黑色吸收剂和无色染料等，加入塑料主体、插入接头处的薄膜，或施加于待焊零件表面，来增加塑料吸收激光的效果。

激光焊没有振动，热输入小，可以获得无变形、无飞边的焊件，可用于焊接薄膜、板材和模制塑料。几种烯烃聚合物如聚乙烯和聚丙烯的薄膜用 CO_2 激光、YAG 激光和半导体激光器都能进行焊接，焊接速度可以达到 50 m/min 甚至更高。激光焊适应性强，能够适用于不同种类材料的连接，如聚合物与金属，或者热塑性弹性体（TPE）与硬质热塑性塑料的连接。

使用激光焊可以焊接的接头形状多种多样，如图 4.16-35 所示，最简单的是单搭结构（图 4.16-35a），单搭结构的焊接面是由上片材料与下片材料重叠在一起形成。对于同种材料的搭接接头，为使底层塑料熔化，上层试件通常会熔化得太多，因此使用激光搭接的一个先决条件就是两个零件之一必须能透过激光而另一个必须能吸收激光，令上下片材料的掺杂不同以造成对激光能量的吸收/透过特性不同，上片材料透过大部分（如 60%）激光能量，成为透过体，而下片材料可以吸收较多的激光能量，称为吸收体。穿透上片材料的光束被下片材料强烈地吸收，直至被加热到熔点。热量由下片材料（吸收体）传导至紧贴的上片材料（透过体），并将其熔化，从而将上下两片紧密地焊接在一起。在其他形

式的接头中，比如斜面、阶梯形、轴心、键槽、楔形以及对接焊中，也需要特殊的透过体和吸收体的配合。如在楔形焊接中，实际上由两片吸收体和一片楔形的透过体组成；而对接焊接则需要焊接的两片材料都是吸收体，对接焊时，由于对熔融态塑料的支撑比较困难，因此对于试件的安装和定位有很高的要求。

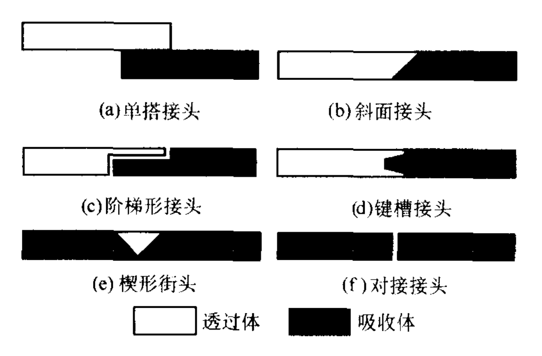


图 4.16-35　塑料激光焊的几种接头形状

由于塑料的熔点低而热导率小，而激光输出强烈而集中，加热速度快，塑料很容易在熔化后继续快速升温发生分解，所以必须精确控制激光光点的能量密度并采用很高的速度以防止材料过热。实际焊接加工中，通常可以将光束散焦或者在材料表面进行快速扫描。激光焊接的接头宽度可以在 0.1 mm 到几毫米的范围内精确调节。焊接的强度依赖于焊接区域的尺寸，对医用聚碳酸酯（PC）、聚甲醛（POM）、聚丙烯（PP）和尼龙（PA6）等塑料激光焊接接头的拉伸试验显示，其强度等同于母材。塑料激光焊中，接头内的污染对接头的强度影响不大。

塑料激光焊接的速度取决于塑料的种类、激光光束的能量强度以及接头的尺寸。用 30 W 输出功率的激光器焊接聚乙烯片，若焊缝宽度为 1 mm，则速度可达到约每分钟 100 mm。

影响塑料激光焊接质量的主要因素有：

1）塑料对激光的吸收率；

2）不同工件吸收率的合理配合；

3）接头形式的合理设计和工件间的精确定位；

4）工艺参数的合理控制（焊接速度，激光输出功率等）。

3.9　焊接方法选择

为了根据不同的塑料种类选择合适的焊接方法，表 4.16-16 列出了一组粗略的对应关系，在此基础上，可以通过试焊摸索进一步的焊接性能。

表 4.16-16　不同种类的塑料与焊接方法的适宜关系

塑料 / 焊接方法	PE	PP	PA	POM	PS	PVC	PMMA	PC	ABS
热气焊接	V	V	V	V	V	V	V	V	V
超声波焊		O	O		V	O		V	V
摩擦焊		V			V			V	
挤塑焊	V	V							
激光焊	V	V							
高频电焊			V			V	V		
热工具焊	V	V							

注：V—焊接性能良好；O—有条件的焊接性能。

4　塑料焊接质量检验

塑料焊接中，由于焊前准备工作不完善、焊接材料存在缺陷、焊接操作方法不正确和焊接工艺条件控制不当等原因，会使焊接接头中存在各种缺陷。表 4.16-7 列出了塑料热气焊时可能出现的缺陷名称、产生原因及其防止措施。这些缺陷的存在，会降低焊缝强度，甚至使工件报废，因此，在焊件使用前，必须探知这些缺陷并及时修补使其合格。此外，为了评估焊工操作水平、优化焊接参数、考察焊接制品是否达到了规定的要求，需要对焊接接头的力学性能进行评价，为此已经建立起了比较完备的热塑性塑料焊接接头的力学性能测试方法，并对一些热塑性塑料焊接接头的最低许用力学性能作出了规定。

4.1　塑料焊接缺陷的检测

1）宏观检查　宏观检查，主要是直接用肉眼或借助低倍放大镜，在焊接前检查坡口准备以及焊接面加工是否符合规定要求，在焊接过程中检查焊接操作是否符合相应的规范，以及在焊接结束后检查焊缝是否有可见的裂纹、气孔、夹杂、未熔合、未焊透、焊缝成形不良、变色和烧焦、母材过热分层等缺陷。有时也用量具检查焊缝的宽度和高度是否均匀一致。

2）电火花检验　利用高频高压的电火花检测器能检测出焊缝中的微小气孔和裂纹。检测时，将检测器的探头和电极沿焊缝的上下表面移动，若焊缝中存在气孔或裂纹，探头与电极间就会产生蓝色电火花，借此可判断缺陷的位置。这种检验方法特别适于检查金属容器塑料衬里焊缝中的缺陷，因为支撑衬里的金属可以提供良好的接地。在没有金属支撑的条件下，可通过涂一层导电涂料或采用金属薄膜来提供良好的接地。对于形状复杂的容器，可以将水银填充到容器内部，从外部进行检测。

3）水压和气压检验　水压和气压检验也称为试漏法检验，主要用于可密封焊接容器的缺陷检查。对常压焊接容器，若充满水后经 24 h 未发现渗漏，即可认为焊缝无缺陷。检验耐压或耐真空焊接容器时，先以 1.5 倍的设计压力进行水压试验，在此压力下保持 5 min 后再降至设计压力，察看有无渗漏。

若焊接容器必须进行气压试验，则将压缩空气按设计工作压力的 1.25 倍压入容器内并浸入水中。采用气压技术时，微小气孔可能检测不出，当存在一定尺寸的气孔时，空气会从内部泄漏形成气泡。检测大型受压容器的焊缝，可在容器外部焊缝上涂肥皂液，在贯穿缺陷处，泄漏的空气就会在水中逸出气泡或肥皂泡。因为肥皂液会导致应力开裂，所以该方法在检测聚乙烯或其他对应力开裂敏感的塑料时不宜采用。

气压密封检验必须在水压试验后方可进行。水压试验和气压试验都必须在特定的场地进行，并保证严密的安全措施，以防止容器爆裂时对周围人和物的伤害。水压和气压检验方法的优点是方法简单、费用少，缺点是不能检查出非贯穿性缺陷，且只能确定缺陷的位置，而不能确定缺陷的性质。

4）煤油渗透检验　该方法适用于不受压容器的致密性试验。检验时，先在焊缝的一面涂上石灰水，再在焊缝的另一面涂上加有染料的煤油，由于煤油表面张力小，对细裂纹有很强的渗透力，当焊缝中存在穿透性缺陷时，有色煤油会通过裂纹在焊缝背面的石灰水中显出痕迹，从而确定焊缝中裂纹的位置。

5）X 射线检验　X 射线是检测塑料焊缝中缺陷最有效的方法。它可以很容易地发现前面所提到的方法不能检测出



的未焊透缺陷。通过X射线照相能获得焊接接头区完整的视觉图像，从而准确地判断出缺陷的性质、位置、大小和形貌等细节，并能提供永久性的记录。为了获得良好的X射线照片，试件与底片之间的距离应尽可能大以减小变形，并令所检查的平面平行于底片而垂直于X射线。该方法的缺点是费用较高，但对某些重要结构，由于焊缝的失效是灾难性的，所以仍有必要对全部焊缝进行拍片。

6）荧光检验　荧光检验的原理与X射线检测一样，不同在于采用荧光屏取代底板进行成像。与X射线检验比，它具有速度快、费用低的优点。由于激励的瞬时性，荧光屏对射线能量的要求很高，而在采用底片曝光的X射线检测中，曝光量可随时间的增加而逐步积累，因此对射线的能量要求较低。

7）其他检验方法　作为现场使用的一种简单检测方法，可以在焊缝完全冷却后，将一段焊条从焊缝中拔出，粗略判断焊接质量的优劣。连接质量好的焊缝，焊缝端部会被撕裂，而连接不好的焊缝，焊条可以轻易地从焊缝中拔出。如果塑料是无色的，可以用可见光照射塑料，从而发现其中的气孔。

4.2　塑料焊接接头力学性能的测试

目前已经建立起了比较完备的热塑性塑料焊接接头力学性能的测试标准，包括拉伸试验、拉伸蠕变试验、低温拉伸试验、弯曲试验、剥离试验等，对一些塑料焊接接头的最低性能要求也建立了相应的标准。

焊接接头的力学性能既与被焊塑料的品种和材质有关，又与焊接工艺方法有关。塑料焊接接头的力学性能常用强度系数来评价。焊接接头强度系数 f 定义为：

$$f = \sigma_{焊} / \sigma_{母} \times 100\% \qquad (4.16\text{-}2)$$

式中，$\sigma_{焊}$ 为焊接接头的强度；$\sigma_{母}$ 为母材的强度。

依据试验方法和条件的不同，塑料焊接接头强度系数又有短时强度系数 f_s，长时强度系数 f_l，及低温强度系数 f_t 等。

（1）焊接接头的拉伸试验

拉伸试验是检验塑料焊接接头质量最重要的基础试验。通过对比塑料焊接前后的抗拉强度并检查焊缝断口的表面状况，可以评价焊接接头的承载能力和焊接质量。

典型的焊接接头抗拉试样见图4.16-36，厚度不同时试样的尺寸列于表4.16-17中。为了能够将焊接接头和母材的抗拉强度进行对比，焊接接头与塑料母材的试样尺寸应一致，其试验条件也一致。焊接接头处的卷边是否去掉依接头的实际使用情况而定。焊接接头和母材试样各自的试样数目

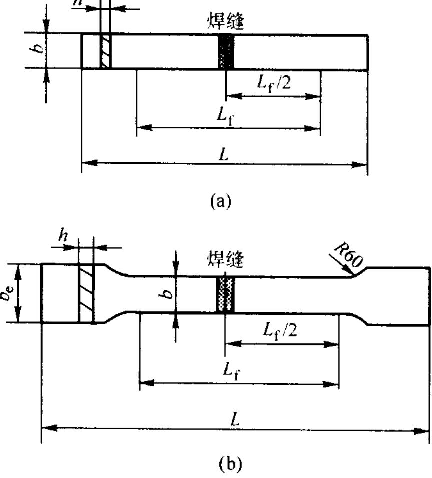


图4.16-36　塑料焊接接头拉伸试样

应都分别不少于5个。

焊接接头的抗拉强度指的是焊缝本身破坏时的强度，因此，当采用图4.16-36a的试样无法造成焊缝处材料破坏时，应改用图4.16-36b的试样。拉伸试验的拉伸速率（指上下夹头的相对速度）是一个重要的试验参数。试验时，焊接接头试样和母材试样的这一参数必须一致。对塑料来说，不同的材料品种、不同的成形工艺，要求不同的试验拉伸速率（表4.16-18）。对于其他品种的塑料，可通过预试验，改变拉伸速率，使母体材料试样约在1 min时达到其抗拉强度，然后以这个拉伸速率测试接头试样。

表4.16-17　拉伸试验中平板试样的尺寸
（摘自 EN12814－2－2000）　　mm

厚度 h	试样 a			试样 b			
	b	L_f	L	b	L	b_e	L_f
$h \leqslant 10$	15	120	≥170	10	≥170	20	115
$10 < h \leqslant 20$	30	120	≥300	30	≥300	40	115
$20 < h$	$1.5h$	200	≥400	$1.5h$	≥400	80	200

表4.16-18　几种塑料拉伸试验时的推荐速率
（摘自 EN12814－2－2000）

材料	拉伸速率/mm·min^{-1}
PVC	10
PVDF，PP－H，PP－B	20
PE，PP－R	50

注：PP－H为均聚聚丙烯，PP－B为等规共聚聚丙烯，PP－R为无规共聚聚丙烯。

材料拉伸试验中试样断裂前的最大载荷除以原受载截面积，即得到材料的抗拉强度。当焊接接头试样的断裂发生在焊缝区域之外时，不能记作焊缝的抗拉强度。

在一般情况下，拉伸试验不必记录试样的应力－应变曲线。试样破坏后，应及时目检断口的情况，判断是塑性还是脆性断裂。正确的焊接通常造成塑性的拉伸破坏，这时，能够发现断口上的材料已有较大的塑性变形。

值得注意的是，拉伸试验所得到的焊接接头强度系数 f_s 仅仅说明了焊接接头短时的强度性能，不能推广用于评价接头的持久性质，一个合格的焊接接头，其短时焊接强度系数必须大于或等于表4.16-19中所列出的最小值。

表4.16-19　几种常用塑料的最小短时抗拉强度系数 f_s
（摘自 EN12814－8－2001）

焊接方法	短时抗拉强度系数 f_s 的许用下限值				
	PE	PP	PVC－C	PVC－U	PVDF
热工具焊	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9
挤塑焊	0.8	0.8	—	—	—
热气焊	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8

注：PVC－C为氯化聚氯乙烯，PVC－U为硬聚氯乙烯。

（2）拉伸蠕变试验

静载荷下塑料结构的设计应基于接头的长时蠕变断裂行为，特别是塑料母材及其焊接接头对裂纹缓慢扩展的抗力。拉伸蠕变试验用来测量接头的长时强度系数，考察裂纹扩展行为及试件的断裂面特征，从而评价接头的长时承载能力和焊接质量。

典型的拉伸蠕变试样与焊接接头短时拉伸试样相同（图4.16-36和表4.16-17），另外也有搭接形式的接头。两种接头



形式既可以用于平板焊接接头也可以用于管焊接接头（可参考欧洲标准 EN12814-3-2000）。是否保留试样上的焊缝卷边应按实际焊接结构是否保留焊缝卷边来决定。每组试样数目应不少于 5 个。

拉伸蠕变试验装置如图 4.16-37 所示。试验时必须注意，正式施加静应力之前，应先作用一个预应力，以使加载系统稳定，紧接着在 3~5 s 的时间内，无冲击地加上静应力直至满负荷。

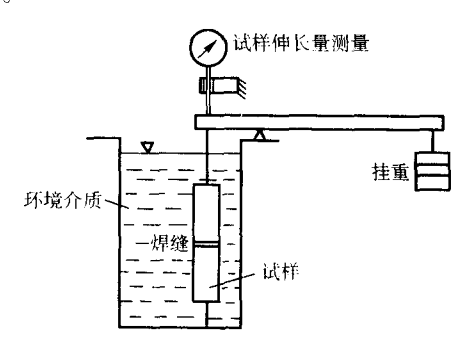


图 4.16-37　塑料焊接接头试样的拉伸蠕变试验装置示意图

同时对焊接接头和母材试样进行拉伸蠕变试验，将他们各自的试验结果代入持久抗拉应力 σ 和断裂时间 t 的双对数坐标图上，得到两条持久强度曲线（图 4.16-38）。选择同一时间，分别在这两条曲线上截取相交点，可以得到焊接接头和母材各自的持久强度 σ_s 和 σ_t，它们的比值就是焊接接头的持久抗拉强度系数 $f_l=\sigma_s/\sigma_t$。只有在焊接接头的持久强度曲线和母材的持久强度曲线相互平行时，全部试验时间内的焊接接头持久抗拉强度系数才相等。曲线不平行时，可依据不同场合和要求在指定参考应力下计算持久抗拉强度系数。

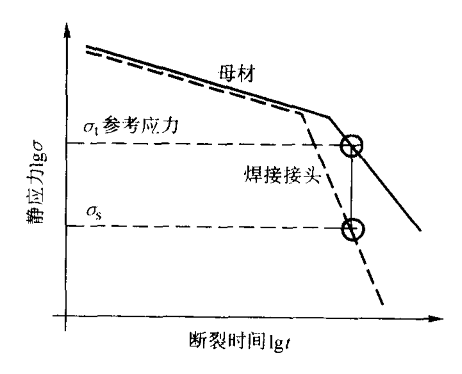


图 4.16-38　蠕变断裂曲线示意图

在可能的情况下，应在持久抗拉试验的同时记录试样长度方向的变化。焊接接头的蠕变以及试样的断口分析也能为评价焊接接头持久性能提供十分有价值的数据。几种常用塑料焊接接头的持久抗拉强度系数见表 4.16-20，低于该表中数据的结果是不合格的。

表 4.16-20　几种常用塑料焊接接头的最小持久抗拉强度系数 f_l（摘自 EN12814-8-2001）

焊接方法	持久抗拉强度系数 f_l 的许用下限值				
	PE	PP	PVC-C	PVC-U	PVDF
热工具焊	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6
挤塑焊	0.6	0.6	—	—	—
热气焊	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

(3) 低温拉伸试验

在低温条件下对塑料焊接接头进行拉伸试验，确定接头低温拉伸强度系数，结合对断口形貌的分析，可对焊接质量和低温下焊接接头的韧性进行评估。

低温拉伸试件的外形和试样尺寸参见图 4.16-39 和表 4.16-21。焊件和未焊母材试样应取自同一块塑料板。焊接完成至少 8 h 后，垂直于焊缝切割试样，切割中应尽量减小对试样的加热，且不许在试样上产生缺口。对每一个试样进行编号，以确定其在被测试塑料板中的位置。试样不进行热处理或机械校直操作。

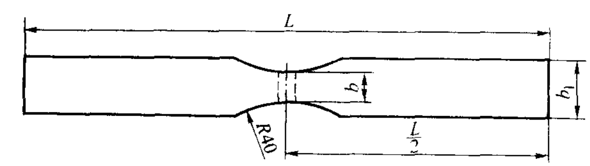


图 4.16-39　塑料焊接接头的低温拉伸试样

表 4.16-21　低温拉伸试验中平板试样的尺寸（摘自 EN12814-6-2000）　mm

试件厚度 a	L	b_1	b
$a\leq10$	160	14	7
$10<a\leq20$	180	18	9
$20<a$	180	28	14

试验中，试样在低温下承受恒速载荷直至断裂。对每一个温度和加载速度，试样不应少于 5 个。如果试样产生屈服现象，则应在更低的温度和/或更高的加载速度下重复试验，以使试样发生脆性断裂。表 4.16-22 列出了一些塑料试验时所采用的加载速度和最高温度，试验中试件的温度变化应小于 5℃。

表 4.16-22　一些塑料试验时所采用的加载速度和最高温度（摘自 EN12814-6-2000）

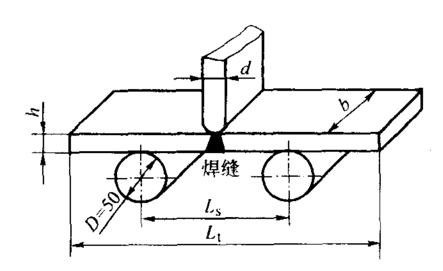
材料	试验速度/mm·min^{-1}	最高试验温度/℃
PVDF	50	-40
PP	50	-40

同时对焊接接头和母材试样进行低温拉伸试验，试样断裂前的最大载荷除以原始试件的截面积，即得到母材和焊接接头各自的断裂应力 σ_w 和 σ_r，它们的比值就是焊接接头的低温抗拉强度系数 $f_t=\sigma_w/\sigma_r$。当焊接接头试样的断裂发生在焊缝区域之外或试样发生屈服时，不能记作焊缝的抗拉强度。试验结束后，应对断裂的类型和断口形貌进行分析，以评价焊接接头在低温和一定加载速度下的断裂行为。

(4) 焊接接头的三点弯曲试验

三点弯曲试验是检验塑料焊接接头焊接质量的常用检验方法之一。通过测量试样弯曲的角度和观察断口的情况，可以定性地了解焊缝的变形能力和焊接的质量。与焊接接头的拉伸实验相比，三点弯曲试验无法给出一个焊接接头的定量评价数据，也无法与母材试样的弯曲试验作直接比较，因此，三点弯曲试验属于工艺性能试验，它更多地用于分析焊接参数和焊接条件对焊接性能的影响，以便确定最佳焊接工艺。为了更明显地反映不同的焊接工艺与焊接接头品质的相互关系，可以有目的地改变三点弯曲试验的试验条件，如降低试验温度或增加弯曲速率等。

塑料焊接接头三点弯曲试验的试样形式、试验方法示意和试样尺寸见图 4.16-40 和表 4.16-23。试样制备时必须去除焊缝处的卷边。



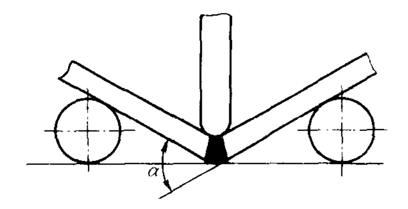


图 4.16-40 三点弯曲试验示意图

表 4.16-23 焊接接头三点弯曲试样的尺寸
（摘自 EN12814-1-2000） mm

试件厚度 h	b	L_t	L_s	d
$3\leqslant h<5$	30	150	80	4
$5\leqslant h<10$	30	200	90	8
$10\leqslant h<15$	30	200	100	12.5
$15\leqslant h<20$	30	250	120	16
$20\leqslant h\leqslant 30$	30	380	160	25

在三点弯曲加载过程中，试样在压头的作用下弯曲，焊缝与压头接触表面受压，背面受拉，从而开裂破坏。根据试验中接头受拉面的不同，弯曲拉伸试验又可分为正面弯曲、背面弯曲和侧面弯曲，以全面了解焊接接头的性能。对于管道的焊接接头，需从接头上切取试样，使其外圆面受压，内圆表面受拉，造成折弯断裂。若试样的厚度大于 30 mm，则需将其单面切削至厚度为 30 mm。对于管接头试样，由外圆表面向内切削至厚度为 30 mm。切取管接头试样时还应注意，根据管壁厚度和管径的不同，所取试样的宽度可与表 4.16-23的要求有些偏差，但试样的宽度最窄不得小于 15 mm。三点弯曲试验的每组试样数目不少于 5 个。

焊接接头的三点弯曲试验可以在材料试验机上进行，也可以手工操作。前者的装样示意图如图 4.16-40，几种材料的推荐试验速度见表 4.16-24，对于其他材料，所采用的压头速度应保证一个试样的测试在 1 min 内完成。手工进行焊接接头三点弯曲试验的示意见图 4.16-41，此时试样的厚度不大于 10 mm。

表 4.16-24 几种塑料三点弯曲试验时的推荐速率
（摘自 EN12814-1—1999）

材 料	压头速度/mm·min⁻¹
PVC	10
PVDF，PP-H，PP-B	20
PE，PP-R	50

焊接接头三点弯曲试验最重要的数据是试样开裂时的弯曲角及压头位移。若试样在图 4.16-40 所示的装置上压到底仍未开裂，则在弯曲角等于 160°或表 4.16-25 所示的压头位移下停止试验。用材料试验机做三点弯曲试验时不易判断焊缝是否开裂，这时可借助记录弯曲压力-位移曲线来帮助判断。

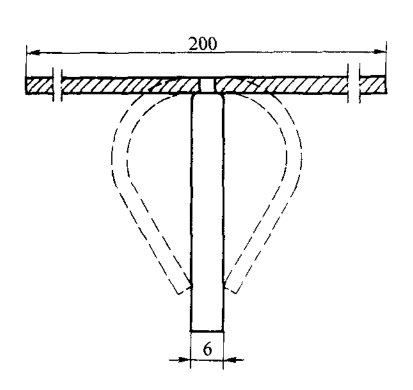


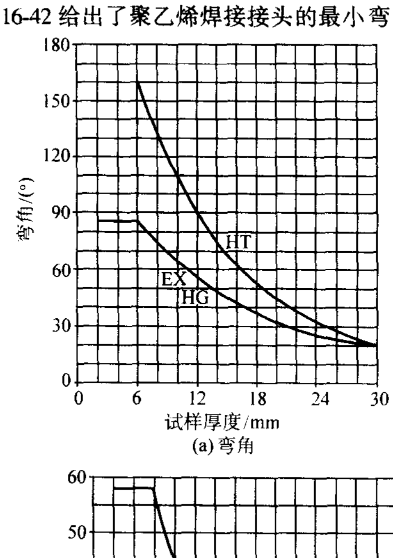
图 4.16-41 手工做焊接接头三点弯曲试验的示意图

表 4.16-25 与 160°弯曲角对应的压头位移
（摘自 EN12814-1-1999） mm

试件厚度 h	位移 H
$3<h\leqslant 5$	60
$5<h\leqslant 15$	70
$15<h\leqslant 20$	85
$20<h\leqslant 25$	170
$25<h\leqslant 30$	150

焊接接头的开裂弯曲角（压头位移）虽然与接头的强度和变形量没有直接的对应关系，但它反映了焊接接头的塑韧性，从而间接地反映了焊接的质量，因此，焊接接头的三点弯曲试验可以用于焊接的“优/劣”评价。

图 4.16-42 给出了聚乙烯焊接接头的最小弯曲角和压头



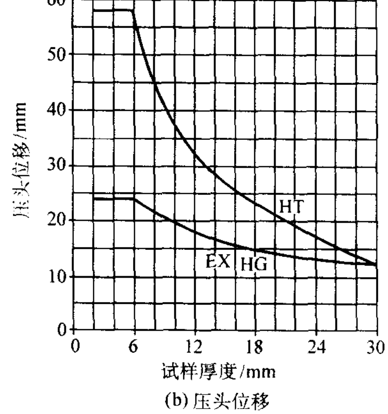


图 4.16-42 高密度聚乙烯的最小弯角和压头位移



位移与试样厚度的关系曲线，其他材料的最小弯曲角和压头位移，可参考相关标准或依据不同的应用场合来确定。若试样在小于曲线所示的弯曲角和压头位移时即开裂，则认为该焊接试样不合格，反之合格。三点弯曲试验中，若 5 个试样中有 2 个试样的弯曲角小于最小弯角，则增加 2 个试样试验（不能超过 2 个），若其弯角依然小于曲线给定值，则这批试样均不合格。由图 4.16-42 可见，焊接接头的弯曲角和压头位移与焊接方法有关（图中 HT 表示热工具焊，EX 表示挤塑焊，HG 表示热气焊）。

（5）剥离试验

剥离试验用于评价搭接接头的性能。平板搭接接头采用 T 形试样的撕裂试验进行评定。名义厚度大于 10 mm 的管/连接件电熔焊接头，可参照标准 ISO 13954 或 EN 12814 - 4 进行减聚试验来评定。对于管套接接头的评定，可采用标准 EN 12814 - 4 中规定的压服试验来进行。

T 形平板剥离试件的外形和试样尺寸参见图 4.16-43 和表 4.16-26。焊件和未焊母材试样应取自同一块塑料板。焊接完成至少 8 h 后，垂直于焊缝切割试样，切割中应尽量减小对试样的加热，且不许在试样上产生缺口。对每一个试样标号，明确其在被测试塑料板中所在的位置。试验前对试样不进行热处理或机械校直操作。

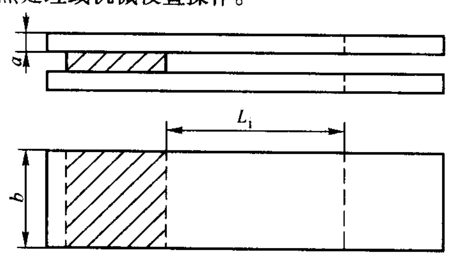


图 4.16-43 塑料焊接接头剥离试样

表 4.16-26 剥离试验中平板试样的尺寸
（摘自 EN12814 - 4—2001） mm

试件厚度（a）	L_1	b①
$a \leq 1.5$	≥ 15	15
$1.5 < a \leq 3$	$\geq 10 \times a$	15
$3 < a \leq 5$	$\geq 10 \times a$	25
$a > 5$	$\geq 10 \times a$	$5 \times a$

① 对增强材料，b = 50 mm。

反向弯曲试样的两个未焊端直至与焊缝垂直，形成 T 形试样（如图 4.16-44 所示）以放入试验机的夹钳中，试验设备应具有可自对准的夹持装置。将试件插入试验设备的过程中不应引起焊缝开裂，若试件开裂，则试验结果无效。剥离试验时，试样承受连续均匀的载荷直至断裂、剥离或发生屈服。为了获得更多的信息，试验中可以记录每个试件的载荷 - 位移曲线。每组试验的试样不应少于 5 个。表 4.16-27 列出了一些塑料试验时所采用的加载速度。

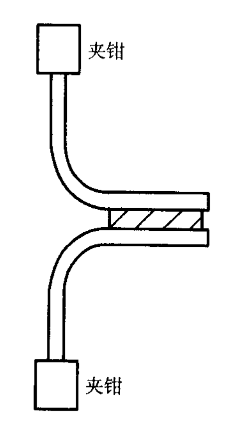


图 4.16-44 剥离试验示意图

表 4.16-27 一些塑料剥离试验时所采用的加载速度
（摘自 EN12814 - 4—2001）

材 料	试验速度/mm·min^{-1}
PVC	10
PVDF，PP - H，PP - B	20
PE，PP - R	50

试验所得断裂载荷的算术平均值除以试件的宽度 b 就得到了试样的剥离抗力，即：$P_1 = \overline{F}_w / b$。剥离抗力的计算中至少应使用 5 个试件。除非试样的断裂发生在夹钳内或其邻近区域，所有的试样都是有效的。

5 塑料焊接的应用

5.1 塑料管道

塑料不仅有优良的化学抗力，而且具有密度小等许多重要的物理性能，因此被成功地应用于管道系统。如聚乙烯的密度仅是钢铁材料的 1/8，而且柔韧性好，具有优良的抗冲击强度，在服役过程中不会出现凹陷或裂纹，避免了采用刚性塑料材料时可能遇到的破坏问题。采用无缝铸造聚乙烯管制造的管道系统还具有光滑的内表面，摩擦阻力小，因此可以减小通风系统中对风扇功率的要求。此外，聚乙烯管道还可以安全地工作在一定的高温下（80℃）。从应用的观点看，聚乙烯具有成型性好的特点，因此可用来制造大型和各式各样的结构。PVC 也在管道系统中得到了广泛应用，特别是在要求有相对较高的抗氧化性的场合。

管道系统通常由事先制造好的各个部件连接而成。图 4.16-45 是采用热工具焊将几个长度不同的塑料直管连接得到的聚乙烯弯头。另外也可以焊接制造不同规格的标准塑料零配件，如法兰、轴套、阀门等，用于各种类型的塑料管道的连接场合。图 4.16-46 为几个 PVC 和聚乙烯阀，从中可以看到塑料阀门可以由精密加工的部件焊接而成。图 4.16-47 为一个在实际酸性环境中服役的 PVC 阀门，该应用中阀门需要在较高应力作用下服役。图 4.16-48 是一个在防锈处理过程中使用的排气系统，其中下方的金属构件已经发生了严重的腐蚀，而上方的聚乙烯管道系统基本没有受到腐蚀环境的影响。图 4.16-49 为氯气干燥和液化车间中使用的 PVC 焊接管道结构，它代替了原有的陶瓷和铅制管道。



图 4.16-45 热工具焊接的聚乙烯弯头



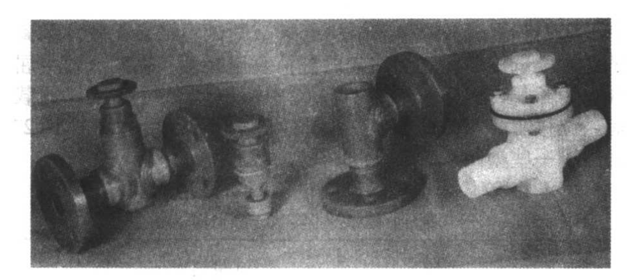


图 4.16-46　聚乙烯（右）和聚氯乙烯焊接制造的阀门

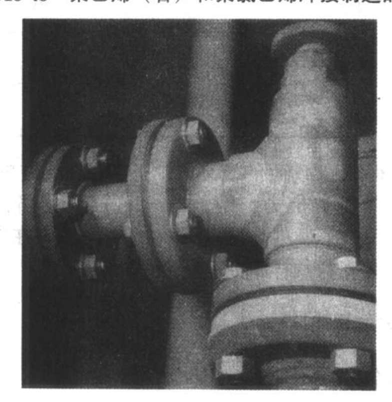


图 4.16-47　在酸性环境中使用的带焊缝聚乙烯阀门

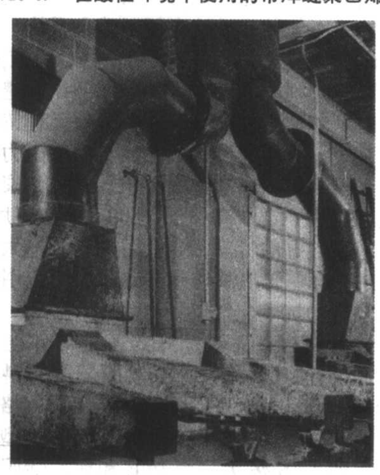


图 4.16-48　聚乙烯焊接排气管道系统
（下方金属部分严重腐蚀）

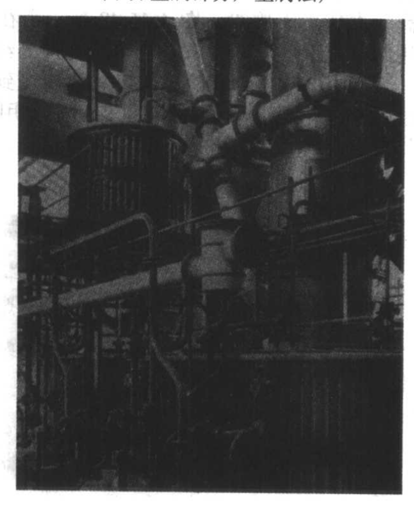


图 4.16-49　氯气干燥和液化车间的聚氯乙烯管线系统

5.2　塑料容器

塑料容器的制造需考虑的因素包括：容器的操作温度、化学环境、塑料的力学性能、电性能、制造的容易程度以及初始制作成本和维护费用等。容器的尺寸很大程度上决定了是制造全塑料容器还是仅在容器内部使用塑料衬里。与采用塑料衬里的结构相比，全塑料容器最重要的优点是没有内应力。图 4.16-50 为一个采用热工具焊接方法制造的聚乙烯浸渍篮和贮液缸。

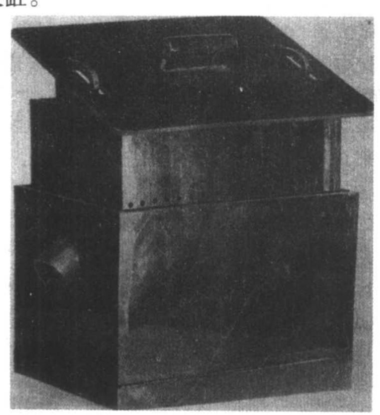


图 4.16-50　热工具法焊接的聚乙烯浸渍篮和贮液缸

由于塑料具有无毒、无污染的特性，在食品加工领域经常用来制造一些小型容器。聚乙烯塑料由于完全没有增塑剂、抗氧化剂和稳定剂，故特别适合于这一应用场合。图 4.16-51 为一个焊接制成的典型的聚乙烯食品加工容器，容积 75 L。这些容器十分坚固耐用，可以从载物台上落下而没有明显损坏。

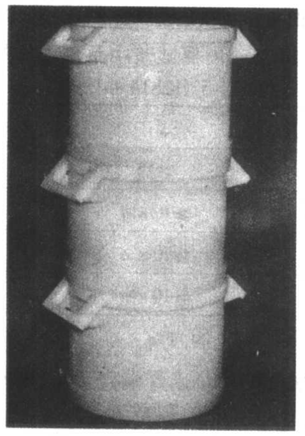


图 4.16-51　焊接制成的聚乙烯食物罐（75 L）

5.3　塑料衬里

目前，塑料衬里已在化工、电镀、食品与饮料加工等领域得到了广泛应用。塑料衬里能够保护金属缸体不被腐蚀，同时外部缸体保证结构具有足够的刚度来承受大的载荷。塑料衬里的正确选择可以防止被加工产品产生的污染，同时减少加工过程中产生的浪费，这在处理贵重产品（如药品）时尤为重要。使用低表面润湿性的衬里，如聚乙烯或聚丙烯，可以更为彻底地回收产品，由于这一点，塑料衬里经常被用于处理放射性同位素，因为这些物质能够相当容易地从塑料衬里上清除。图 4.16-52 为采用热气焊方法在 7.5 m^3 大型容器上焊接厚度为 8.0 mm 的聚乙烯衬里的情形，焊接前，需要将衬里点焊固定，必要时还需要用木支撑进行定位。



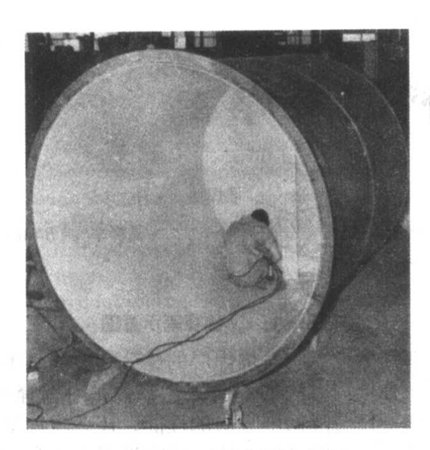


图 4.16-52　聚乙烯衬里焊接

5.4　其他应用

塑料的焊接在其他一些领域也获得了应用。如在大批量生产的塑料件的设计阶段，经常需要制造出产品原型，热气焊和热工具焊是这些原型制造中重要的加工手段。图 4.16-53 是用焊接与机械加工方法相结合制造的聚乙烯排水槽原型，该产品原型随后可用于大批量的注模生产。

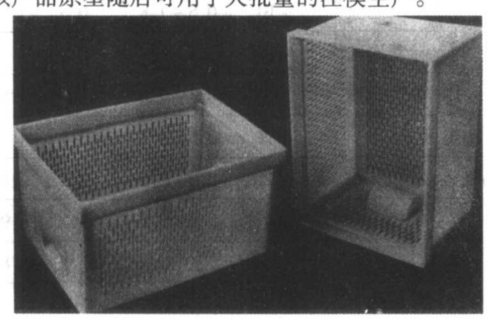


图 4.16-53　焊接制造的聚乙烯排水槽原型

尽管很多热塑性塑料的热导率很低，但在需要优越的防腐性和对产品成型性能要求高的场合，塑料热交换器也得到了应用，特别是用来替代陶器和玻璃产品。图 4.16-54 是一个完全用热工具法焊接制造的线型聚乙烯热交换器，加工过程中，被加热的塑料缠绕在一个适当直径的心轴上，最终成型后安装在支撑架上。该热交换器的支撑为钢材，并镀上聚乙烯材料以提供必要的防腐蚀性能。

此外，在加工工业中，当产品数量较小时，塑料焊接常用来代替注塑等其他制造方法来生产一些产品，如化学处理时的支撑、浸渍篮（图 4.16-55）和搅拌设备以及一些特殊的管道等。

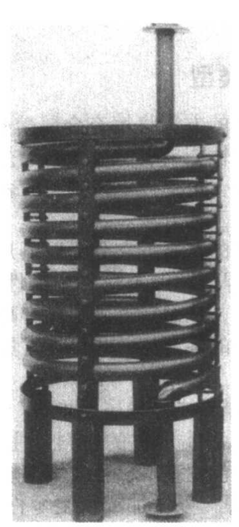


图 4.16-54　热工具法焊接的聚乙烯热交换器

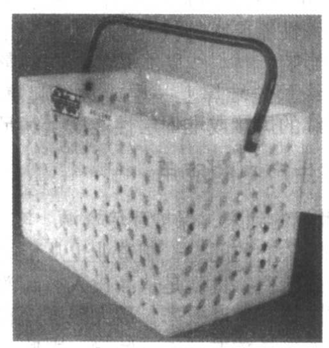


图 4.16-55　焊接制造的聚乙烯浸渍篮（把手为聚氯乙烯）

随着塑料焊接技术的不断发展和新型塑料的不断涌现，塑料焊接件必将在各行各业发挥越来越大的作用。

编写：常保华（清华大学）

第 17 章　金属材料的堆焊

1　概述

1.1　堆焊及其类型

堆焊是用焊接的方法将填充金属熔敷在基体材料表面，以获得特定的表层性能或表面尺寸的工艺过程，它是焊接领域的重要组成部分，也是近年来兴起的表面工程和再制造技术中的不可缺少的工艺方法。

根据堆焊的目的，可把它分为以下几种类型。

1）耐磨层堆焊　一般是在一个韧性好的母材上堆焊具有高耐磨性的材料，从而获得表层具有高的耐磨性，同时又具有优良综合性能的零部件，并可节省贵重金属，降低制造成本。

2）耐蚀层堆焊　或称包覆层堆焊　一般在低合金钢或碳钢表面堆焊具有耐腐蚀性的材料，往往要求该堆焊层完整、光滑，能完全包住基材，且对堆焊层成分要求较严。

3）增厚层堆焊　以增加或恢复零件尺寸为目的的堆焊层，堆焊层材料一般与母材相同。

4）隔离层堆焊或称过渡层堆焊　在进行异种材料焊接或焊接具有特殊性能要求的材料时，为了防止母材的不良影响（包括成分影响、材料线膨胀系数不同的影响等）在母材表面或坡口边缘预先堆焊上一层或数层起隔离作用的堆焊层，以保证后续的焊接或堆焊层性能质量满足设计要求。

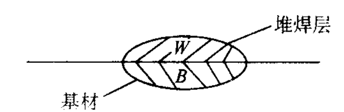
1.2　堆焊在生产中的应用

随着 21 世纪的到来，保护环境资源，实现可持续发展，已成为各国共同关心的问题，制造业也从传统的制造模式向可持续发展模式转变，也就是从高投入、高消耗、高污染的传统发展模式向提高生产效率，最大限度地利用资源和最低限度产出废物的可持续发展模式转变。因此，近年来表面工程和绿色再制造工程得到迅猛发展，而堆焊又是表面工程和再制造工程中的重要技术手段。由于堆焊层致密性好，与母材能实现冶金结合，结合强度高，易满足各种不同工况的要求，使用范围广；堆焊能获得的表面层厚度最大；所用的设备比较简单，经常可与焊接设备通用；堆焊受工件大小、形状的限制小，易于实现工地现场施工；作为传统的工艺手段，堆焊在技术上也较成熟，因此，目前已广泛用于矿山、冶金、农机、建筑、电站、铁路、车辆、石油化工设备、核动力及工具、模具等的制造、修复中，并已成为近年来得到最广泛应用的表面技术之一。而且还不断采用了新开发或新引进的堆焊技术，如内壁大面积耐蚀堆焊采用了高速带极堆焊、带极电渣堆焊及 MIG 堆焊；大面积耐磨复层钢板制造采用了外添加合金粉粒的丝极摆动埋弧堆焊；此外，碳极空气等离子堆焊、耐磨合金感应堆焊、脉冲电弧堆焊、真空熔结等新工艺也在不同零部件的制造和修复中得到应用。堆焊新材料的开发更是数不胜数。堆焊技术在生产中的广泛应用，为我国实现可持续发展的战略目标作出了重要贡献。

1.3　堆焊中需注意的几个问题

堆焊虽属熔化焊，但由于它有以获得特定表层性能这一特殊的目的，因而带来一些堆焊时需要特别注意的问题。

1）稀释率　熔敷金属因母材的熔入而被稀释，稀释的程度用母材在堆焊层中所占的百分比（即稀释率）来表示，如图 4.17-1 所示。



稀释率%= $B/(W+B)\times100\%$

图 4.17-1　稀释率示意图

稀释率强烈地影响着堆焊层的成分和性能，不同的堆焊方法和同一种堆焊方法的不同工艺参数都对稀释率有影响，高的稀释率不仅会降低堆焊层的性能，还会增加堆焊材料的消耗，因此，在选择堆焊方法，确定堆焊工艺和设计堆焊材料成分时，均应考虑稀释率的影响，并争取尽量减小稀释率。其中堆焊工艺方法的影响更为重要，各种堆焊方法的稀释率见表 4.17-1。

表 4.17-1　几种堆焊方法特点比较

堆焊方法		稀释率① /%	熔敷速率 /kg·h⁻¹	最小堆焊厚度/mm	熔敷速率 /%
氧－乙炔焰堆焊	手工送丝	1～10	0.5～1.8	0.8	100
	自动送丝	1～10	0.5～6.8	0.8	100
	手工送粉	1～10	0.5～1.8	0.2③	85～95
手工电弧堆焊		10～20	0.5～5.4	3.2	65
钨极氩弧堆焊		10～20	0.5～4.5	2.4	98～100
熔化极气体保护电弧堆焊		10～40	0.9～5.4	3.2	90～95
其中：自保护电弧堆焊		15～40	2.3～11.3	3.2	80～85
埋弧堆焊	单丝	30～60	4.5～11.3	3.2	95
	多丝	15～25	11.3～27.2	4.8	95
	串联电弧	10～25	11.3～15.9	4.8	95
	单带极	10～20	12～36	3.0	95
	多带极	8～15	22～68	4.0	95
等离子堆焊	自动送粉	5～15②	0.5～6.8	0.25③	85～95
	手工送丝	5～15	0.5～3.6	2.4	98～100
	自动送丝	5～15	0.5～3.6	2.4	98～100
	双热丝	5～15②	13～27	2.4	98～100
电渣堆焊		10～14	15～75	15	95～100

① 指单层堆焊结果。
② 钢母材上堆焊铜及铜合金可低到 2%。
③ 较早些的文献记载为 0.8。

适当调整堆焊工艺参数，如尽量小的电流，尽可能快的焊速，增加横向摆动频率等，也可在一定程度上降低堆焊层稀释率。

2）熔合区　由于堆焊属于异种材料的熔化焊，因此在堆焊金属和基材热影响区金属之间存在着一个成分和组织均有别于二者的熔合区，该熔合区可能是延性较差的脆性层；在高温条件下工作，熔合区上可能出现碳迁移现象；由于线膨胀系数差别大，在焊后冷却、热处理或运行过程中，会产生较大的热应力，甚至会导致堆焊层开裂或剥落；在钢材上堆焊有色金属会使有色金属受铁的污染等。因此在堆焊时对熔合区要给予特殊的关注。低稀释率的堆焊方法和堆焊工艺可减少熔合区的不利影响，必要时可堆焊隔离层。



3）热循环　由于堆焊在大多数情况下均为多层焊或多层多道焊，后续焊道使先焊的焊道反复多次受热；又由于堆焊时经常需采用预热，层间保温，焊后缓冷或焊后热处理等措施，因此，堆焊金属承受了复杂的热循环，容易造成堆焊层组织的不均匀性，还可能使晶粒粗化；碳化物或 σ 相也有可能析出等，进而影响到性能的均匀性。另外，不同的堆焊方法，工件所受的热循环会有很大差别，致使同一种材料堆焊会得到不同的组织和性能，也应引起注意。

4）热应力　由于堆焊材料和母材在成分和性能，特别是线膨胀系数方面往往有较大差异，再加上堆焊时所受的热循环较复杂，因此在堆焊后冷却、热处理或服役过程中会产生很大的热应力，容易引起堆焊件的变形或开裂。采用焊前预热、焊后进行消除应力处理或堆焊过渡层等措施均可减小热应力。另外，热应力能否引起堆焊层开裂还与材料的强度、塑性大小有关，堆焊合金中奥氏体不锈钢塑性、韧性最好，强度中等，一般不会引起开裂；马氏体钢塑性差，但强度高，比奥氏体钢易产生裂纹，而高碳合金铸铁抗压性好，但抗拉性差，最易产生开裂现象。

5）母材　堆焊时母材的情况是相当复杂的，尤其是在进行已损零部件的修复堆焊时，必须弄清原始零件的成分、性能、热处理状态以及工况条件，据此来确定堆焊材料、方法和工艺，如堆焊件母材的碳当量较高，则为了防止裂纹的产生，往往需采用预热、保温、缓冷等措施，必要时还可堆焊碳当量较低、韧性较好的过渡层。当堆焊用于新件制造时，则母材的选择除需满足结构设计和成型方式的要求外，还需考虑它的焊接性和与堆焊材料的匹配性，如对母材没有特殊要求时，一般希望选用焊接性较好的 w（C）0.20%～0.45%碳素钢，或碳当量较低的低合金高强钢、耐热钢和铬镍奥氏体不锈钢；如要求高韧性，也可选用奥氏体高锰钢。

2　金属材料堆焊

要进行金属材料的堆焊，必须解决以下两方面的问题：一是根据堆焊件的服役条件，母材材质及堆焊层的性能要求等选定堆料材料；二是选择合适的堆焊方法，并制定相应的堆焊工艺。

2.1　堆焊工艺方法

几乎任何一种焊接方法都可以用于堆焊，关于每种堆焊方法的详细介绍请参见本大典第 9 卷《材料表面处理工程》中的第 6 章内容，在此只作简略介绍。

选择某种堆焊方法时需考虑的因素很多，但总的来讲，希望堆焊方法有较小的母材稀释率、较高的熔敷速率和优良的堆焊层性能。每种堆焊方法各有其优缺点，目前常用堆焊方法的主要特征参数见表 4.17-1。

1）氧-乙炔焰堆焊　设备简单，稀释率低，成分较稳定，工件温度梯度小，不易出现裂纹。但生产率低，工件吸热多，变形大，适于批量不大的中、小件小面积堆焊。

2）手工电弧焊　设备简单、操作灵活，可达性好。但工件温度梯度大，易出现裂纹，且稀释率高，适于小批量和不规则工件堆焊及现场修复。

3）钨极氩弧焊　可见度好，堆焊层形状容易控制，电弧稳定，飞溅小，堆焊层质量优良，手工钨极氩弧堆焊工件吸热少，变形小，但稀释率比氧-乙炔焰堆焊大。自动钨极氩弧堆焊可获得质量更高，更稳定的堆焊层。填充材料可以是实心丝、药芯丝，铸条或粉末材料。但堆焊效率较低，适于堆焊小的和形状复杂的工件。

4）熔化极气体保护电弧堆焊　可见度好，可半自动或全自动堆焊。又可分 CO_2 气体保护堆焊、氩气保护堆焊和自保护药芯焊丝堆焊。其中氩气保护堆焊层质量最高。工艺规范直接影响稀释率，短路过渡熔深较浅，稀释率可达 5%；喷射过渡时稀释率则达 40%，向熔池送入辅助填充金属（实心丝、药芯丝、金属颗粒）可减少熔深，稀释率可降至 3%～5%，且提高熔敷速率。自保护药芯焊丝堆焊，干伸长可加大，焊丝直径可较粗（ϕ2.4 mm），有利于提高熔敷速率（2.3～11.3 kg/h）。

5）埋弧堆焊　埋弧、无飞溅及电弧辐射，劳动条件好，外观成形光滑，易实现机械化、自动化。它又可分为单丝、多丝、单带极、多带极埋弧堆焊。单丝埋弧堆焊稀释率最高，熔敷速度最低，一般需堆焊 2～3 层才能满足要求。为了提高效率和降低稀释率，发展了添加冷丝，撒放合金剂和振动堆焊等方法。撒放合金剂可使稀释率降至 10% 以下，堆焊效率提高 3 倍以上。多丝埋弧堆焊比单丝效率高，稀释率低。如串列双丝双弧、并列多丝加摆动等。在大面积耐蚀堆焊中用得最多的是带极埋弧堆焊，它比丝极埋弧堆焊有低的稀释率和高的熔敷速率，带宽已从 30 mm 的窄带发展到 60 mm、75 mm 甚至 120 mm 的宽带极。随着带宽的增加，必须有磁控装置，以防止由于磁偏吹引起的咬肉等缺陷。带极材料可以是实心带极，也可以是药芯带极。

6）电渣堆焊　是利用导电熔渣的电阻热来熔化堆焊材料和母材的堆焊过程。目前用得较多的是带极电渣堆焊，它比带极埋弧堆焊有高约 50% 的生产效率和更低的稀释率（一般可控制在 10%以下）及良好的焊缝成形，不易有夹渣等缺陷。表面不平度小于 0.5 mm，单层堆焊即可满足要求，且无需机械加工。适用于压力容器内表面大面积堆焊，堆焊层合金化除通过电极外，还可把合金粉末加入渣池或涂在电极表面。电渣堆焊用于堆焊在含氢介质中工作的工件时，由于焊接速度较低，热输入较大，造成母材和堆焊层之间的边界层晶粒粗大，使堆焊层抗氢致剥离性能下降，故用电渣、电弧联合过程的高速带极堆焊更为适宜。由于其热输入较大，一般只适用于堆焊大于 50 mm 的厚壁工件。

7）高速带极堆焊　由于焊接速度的提高（一般带为 75 mm 时，焊接速度可达 25～28 cm/min）堆焊过程由电渣过程变成电渣、电弧的联合过程，但以电渣过程为主，因此基本保留了电渣堆焊高效、低稀释率的优点，且因焊速高，对母材热输入小，边界层晶粒细小，多呈马氏体和奥氏体双相组织，用于堆焊在氢介质中工作的工件时，大大提高了抗氢致剥离性能，而且工件变形小，可堆焊较薄的工件。由于焊速高，焊接电流大，磁收缩现象更严重，因此对磁控装置的要求也更高。一般需堆焊两层才能满足要求。

8）等离子弧堆焊　明弧、堆焊层形状容易控制、成形平整，不加工或少加工即可使用。等离子弧温度高，能量集中，热利用率高，热梯度较大，为防止开裂，大工件堆焊时需预热。

根据填充金属送给方式及堆焊材料种类的不同，大致可分为冷丝（实心焊丝、药芯焊丝、铸棒、焊带）等离子弧堆焊、热丝（实心或药芯）等离子弧堆焊、预制型等离子弧堆焊、粉末等离子弧堆焊。等离子弧堆焊稀释率较低（堆焊一层即可满足要求），一般熔敷速率也较低，但热丝等离子弧堆焊用电阻热将焊丝加热至熔点，并连续熔敷于等离子弧前面，可大大提高熔敷速率。粉末等离子弧堆焊的最大优点是堆焊材料品种非常多，各种难轧拔的合金均能制成粉末，且能把 WC 颗粒加入粉末中进行堆焊。为了提高粉末等离子弧堆焊的熔敷速率，近年研制的大功率粉末等离子弧堆焊焊枪可使熔敷速率提高到 15 kg/h 以上，而稀释率仍保持在 5%以下。

总之，在工程应用中选择堆焊方法可依据各种堆焊方法的特点，堆焊材料的形状，对堆焊层性能的要求，堆焊件的



结构、材质、批量以及堆焊的经济性等多方面因素综合考虑决定。

2.2　堆焊材料的形状

堆焊方法不同要求的堆焊材料形状也不同，而堆焊材料形状的不断开发，又促进了堆焊过程的机械化和自动化。

常用的堆焊材料形状可分条状、丝状、带状、粉料状、块状等。

条状堆焊材料有焊条、管状焊条、铸条等，管状焊条可以方便地调整堆焊成分，且合金过渡系数较药皮过渡高。

丝状堆焊材料有实心焊丝、药芯焊丝、水平连铸丝，后二者使难以轧拔的高合金材料制成了能实现机械化生产的丝材。

带状堆焊材料有实心焊带、药芯焊带。

粉粒状堆焊材料包括合金粉和焊剂。几乎所有的合金均能制成粉粒状，故其成分范围非常广。合金粉也可加入胶黏剂制成糊状使用。焊剂中的烧结焊剂和黏结焊剂可过渡合金。

块状堆焊材料是将粉料加胶黏剂压制而成，可用碳弧或其他热源进行熔化堆焊。成分调整也比较方便。

常用的堆焊材料形状及其适用的堆焊方法列于表4.17-2。

表4.17-2　堆焊材料的形状及适用的堆焊方法

堆焊材料形状		适用的堆焊方法
条状	焊条	手工电弧堆焊
	铸条（丝）	氧-乙炔焰堆焊、等离子弧堆焊、钨极氩弧堆焊
丝状		氧-乙炔焰堆焊、钨极氩弧堆焊、熔化极气体保护电弧堆焊、埋弧堆焊、振动堆焊、等离子弧堆焊
带状		埋弧堆焊、电渣堆焊、高速带极堆焊
粉状		等离子弧堆焊、氧-乙炔焰堆焊
块状		碳弧堆焊等

2.3　堆焊金属的使用性能

选择确定堆焊材料必须首先了解各类堆焊合金的使用性能。堆焊金属的使用性能主要包括耐磨性、耐腐蚀性、耐气蚀性和耐高温性等。

(1) 堆焊金属的耐磨性

堆焊金属的耐磨性是指堆焊金属表面抵抗各种磨损的能力。它是材料在使用过程中由于表面被固体、液体或气体的机械作用引起的材料脱离或转移而造成的损伤。它又可分成黏着磨损、磨料磨损、疲劳磨损、冲击磨损和微动磨损等基本类型。

1) 黏着磨损　相对滑动的磨擦副在载荷作用下，个别接触点焊合，进而撕裂并发生分离的过程。该类磨损约占工程磨损总量的15%。根据外加载荷的大小又可分成轻微磨损、金属性磨损和擦伤（包括撕脱和咬死）三类。当外加载荷较小，滑动表面因摩擦热而形成一层氧化膜，阻止了滑动表面的焊合，磨损很轻微。当载荷较大，滑动表面因焊合而严重磨损，称金属性磨损。当金属性磨损产生的磨屑尺寸大于滑动面之间的间隙以及运动部件产生咬合时称为擦伤。

一般来说，材料硬度越高，耐黏着磨损性越好，但二者并非简单的线性关系，在一定程度上，材料的组织结构起着更重要的作用。另外，一般情况下，异种材料形成的摩擦副以及有一定硬度差的摩擦副具有更好的耐黏着磨损性。

常用的抗黏着磨损的堆焊金属有铜基合金、钴基合金和镍基合金等，铁基合金在阀门行业也有相当广泛的应用。

2) 磨料磨损　由外来的磨料粒子的切削作用造成的磨损称为磨料磨损。工程中半数以上的磨损属于该类磨损。它又可分成低应力磨料磨损、高应力磨料磨损、凿削磨损和冲击浸蚀等几种。当作用应力低于磨料本身的压溃强度时，由于磨料的微切削作用而造成的磨损称为低应力磨料磨损，其一般的磨损形态为表面擦伤，材料次表面变形很小。由于应力较低，对材料的抗冲击性能和韧性要求不高。高硬度的马氏体合金铸铁和高铬合金铸铁是最常用的抗低应力磨料磨损的堆焊材料。

当工件表面所受的局部应力大于磨料的压溃强度时，磨料不仅被压入金属表面，而且金属中的脆性相破裂并使基体组织产生塑性变形，通过擦伤、疲劳、塑性变形等过程导致表面材料损伤，该种磨损称为高应力磨料磨损。耐该类磨损的材料既要求有高的屈服强度，而且要有高的硬度。高铬马氏体铸铁、碳化钨堆焊材料以及具有优良的加工硬化性能的高锰钢都被广泛应用于耐高应力磨料磨损的工件中。

当磨料粗大，在高压力和冲击作用下，使磨料切入工件表面，并从材料表面凿削下大颗粒的金属，形成肉眼可见的深凿槽。这种磨损称为凿削磨损。具有优异的韧性和加工硬化性能的高锰钢是常用的抗凿削磨损堆焊材料。

当运动流体中挟带的固体质点对表面高速冲击产生的磨损称为冲击浸蚀。在韧性好的工件表面将产生压痕或凿削破坏，而在脆性材料表面则会产生裂纹。冲击浸蚀的严重程度取决于质点大小、形状、浓度、速度和冲角。冲角大小是选择堆焊材料的关键因素，小冲角时，需选高硬度的含有大量硬质相的过共晶合金作为堆焊材料，如合金铸铁堆焊层或金属陶瓷、镀铬等。大冲角时，选用能吸收冲击能而不产生变形或开裂的材料（如亚共晶合金）抗冲击浸蚀性最高。

堆焊层的组织结构对耐磨料磨损的性能影响极大。提高堆焊层硬度对材料耐磨料磨损性的影响，只有当磨料硬度和堆焊层经磨损一段时间后的硬度值之比接近1时，才有显著作用。

3) 疲劳磨损　或称接触疲劳磨损　相对滚动或滑动的摩擦副表面受到周期性载荷的作用，当接触区应力超过材料强度极限时，将在表层或亚表层引起裂纹并逐渐扩展，导致金属断裂剥落。选用具有足够强度的堆焊材料可提高其抗疲劳磨损的能力。

4) 冲击磨损　金属表面在外来物体连续大速度的冲击下产生表面变形、开裂或凿削剥离的损伤，称为冲击磨损。当母材有足够的强度，而冲击产生的表面应力又低于堆焊材料的压缩屈服应力时，则在冲击作用下不会产生次表面的流变，因此即使像马氏体合金铸铁、高铬合金铸铁等脆性堆焊层也能在轻度或中度冲击条件下长期工作。

当冲击速度很高时，即使冲击功不大，也能使表面应力大大超过材料的抗压屈服强度，此时，奥氏体锰钢，由于具有不稳定的奥氏体组织，当受到严重冲击时，产生表面硬化，而次表面仍为高韧性的奥氏体，从而成为最常用的抗严重冲击或严重冲击与磨料磨损联合作用时的堆焊材料。

5) 微动磨损　两固体接触面，由于出现周期性小振幅振动而造成的损伤。它经常是疲劳磨损、黏着磨损、磨料磨损和腐蚀磨损兼而有之的综合磨损形式。工程中存在相当广泛。



微动磨损的影响因素极多，且各因素间相互影响。由于微动磨损常常从黏着磨损开始，故凡能防止黏着磨损的材料均对抗微动磨损有利。另外，钢中加入 Cr、Mo、V、P、稀土等元素也能改善抗微动磨损性能。

（2）堆焊金属的耐腐蚀性

金属受周围介质作用而引起的损坏叫作腐蚀。按照腐蚀的机理可分为化学腐蚀、电化学腐蚀和物理腐蚀。

1）化学腐蚀是金属与非电介质溶液发生化学反应而引起的损坏。腐蚀产物在金属表面形成表面膜，表面膜的性质决定化学腐蚀的速度。如果表面膜的完整性、强度、可塑性都较好，线胀系数与金属相近，膜与金属的黏着力强等，则能对金属提供有效的保护而减缓腐蚀。铝、铬、锌、硅等能生成完整、致密、黏着力强的氧化膜，从而能减缓腐蚀。

2）电化学腐蚀是金属与电解质溶液相接触时，由于形成原电池而使其中电位低的部分遭受的腐蚀。地下金属管线的土壤腐蚀、金属在潮湿大气中的大气腐蚀、不同金属接触处的电偶腐蚀等，均属于电化学腐蚀。

3）物理腐蚀是金属在某些液态金属中由于溶解作用而引起的损坏或变质。

常用的抗腐蚀堆焊合金有铜基合金、镍铬奥氏体不锈钢、镍基合金和钴基司太立合金。

（3）堆焊金属的耐气蚀性

气蚀是一种腐蚀和磨损联合作用的损伤过程。一般产生于零件与液体接触并有相对运动的条件下，如水轮机叶片、船用螺旋浆、泵的叶轮、热交换器管路等。当液流的压力发生急剧变化时，会在低于蒸发区的低压区产生气泡，被液流带到高压区的气泡会溃灭，并产生极大的冲击力和高温。由于气泡产生和溃灭的反复作用，使零件表面产生疲劳而逐渐脱落，并形成麻点。麻点会成为液体介质的腐蚀源，最后使表面成泡沫海绵状。气蚀往往不单纯是机械力造成的破坏，液体的化学、电化学作用，液体中的磨料均会加剧该破坏过程。

改进过流部件的外形设计和合理选材是防止气蚀的两大基本措施。如果材料既有较好的抗腐蚀性，又有较高的强度和韧性（如铬镍、铬锰奥氏体不锈钢），则具有较好的抗气蚀性能。某些常用材料的相对耐气蚀性如表 4.17-3 所示。

表 4.17-3　一些常用材料耐气蚀性比较

材料名称	耐气蚀性
司太立钴基合金	高
尼龙	↑
镍铝青铜	
奥氏体不锈钢	
铬不锈钢	
蒙耐尔合金	
锰青铜	
铸钢（低碳低合金钢）	
青铜	
灰铸铁	低

（4）堆焊金属的耐高温性

金属在高温下工作，可能产生氧化、起皮；组织因回火或相变而软化或脆化；长期在高温下服役而产生蠕变破坏；承受反复加热和冷却而导致热疲劳破坏或热冲击破坏等，这些情况使在高温环境中服役的工件的磨损、腐蚀问题更复杂化。因此必须根据工作条件仔细选择能在高温下工作的合适的堆焊材料。

马氏体 Cr13 钢、高速钢、高铬铸铁、镍基合金、钴基合金等都可作为耐高温的堆焊材料，用于不同温度档次，不同失效型式的零部件堆焊中，其中钴基合金因兼具优异的抗高温磨损、高温腐蚀和高温氧化性等而认为是目前最优的耐高温堆焊材料。

2.4　堆焊合金的分类

随着制造业逐步向可持续发展模式的转变，堆焊的应用越来越广泛。它已从单纯修复磨损零件的工艺发展成为制造具有很高的耐磨、耐热、耐蚀等特殊性能要求的双金属零件的重要手段。为了满足各种不同的性能要求和追求最佳经济效益，已开发出品种繁多的堆焊材料。为了方便地了解和正确地选择堆焊材料，必须对堆焊合金进行合理的分类。材料的成分和组织结构对性能都有重要的影响，因而堆焊合金的分类必须同时考虑这两种因素。

所有的堆焊合金可归纳为铁基、镍基、钴基、铜基和碳化钨堆焊材料等几种类型。铁基堆焊金属性能变化范围广、韧性和抗磨性配合好，能满足许多不同的要求，而且价格较低，所以使用最广泛，品种也最多。镍基、钴基堆焊合金价格较高，由于高温性能好、耐腐蚀，主要在要求耐高温磨损、高温腐蚀的场合使用。铜基材料由于耐蚀性好，并能减少金属间的磨损，也常被选作堆焊金属。而耐磨料磨损性能最好的碳化钨堆焊材料，虽价格较贵，但在耐严重磨料磨损和工具堆焊中占有重要的地位。

铁基堆焊金属由于含碳量、合金含量和冷却速度的不同，堆焊层的基体组织可以有马氏体、奥氏体、珠光体和莱氏体碳化物等几种基本类型。

碳是铁基堆焊金属中最重要的元素。铬、钼、钨、锰、硅、钒、镍、钛、硼等合金元素不但影响堆焊层中硬化相的形成，而且对基体组织的性能也有影响。当含碳量较低时，以铁素体为基体，由于硬度太低，堆焊中几乎不用。当碳增大到 0.8%时，焊后空冷时堆焊层基体组织以珠光体为主，硬度比铁素体高，韧性较好。加入少量合金元素后，珠光体组织细小，硬度较高。当合金元素更多时，奥氏体在冷却过程中将转变成马氏体或贝氏体，马氏体强度、硬度都很高、耐磨性好。另外，马氏体有很高的屈服强度，使堆焊层能经受中度的冲击。奥氏体较软，强度和韧性较高，含锰的奥氏体有较显著的加工硬化性能。空淬钢通常都含有少量残余奥氏体。随着合金元素含量的增加，残余奥氏体在堆焊层中的比例上升。当稳定奥氏体的合金元素含量很大时（例如 Mn12%或 Cr18% + Ni8%），奥氏体完全不发生转变，直到室温时，堆焊层仍为奥氏体组织。这时堆焊金属屈服强度较低，在中度冲击下就会发生变形。当碳含量增大到 1%以上时，堆焊层中出现碳化物。脆性和耐低应力磨料磨损性能同时加大。而当碳含量超过 1.7%时，就成为耐磨料磨损性能很好的合金铸铁型的堆焊层。合金碳化物比 Fe_3C 硬，尤其是 M_7C_3 型碳化物硬度更高，耐磨性更好。碳化钨、碳化铬都比石英硬，所以碳化钨复合材料堆焊层和高铬合金铸铁堆焊层都有很高的抗低应力磨料磨损的能力。对于高应力磨料，还必须有硬的基体支承碳化物。因此，基体为马氏体的合金铸铁更耐磨。

合金元素对铁基合金堆焊层的性能也有很大影响，钨、钼、钒和铬使堆焊层有较好的高温强度、并能在480～650℃时发生二次硬化效应。铬使材料有很好的抗氧化性能，在 1 090℃时，Cr25%就能提供很好的保护作用。

钴基、镍基堆焊金属的基体都是奥氏体，它们的硬化相除了碳化物外，还有硼化物、金属间化合物和共晶相等。

综合考虑堆焊金属的成分和堆焊层的组织结构，堆焊金属可分成下列几类：铁基堆焊金属；珠光体类堆焊金属；马氏体类堆焊金属（除低碳、中碳、高碳马氏体钢外，还包括



高速钢、工具钢及 Cr13 型高铬不锈钢）；奥氏体类堆焊金属（高锰奥氏体钢、铬锰奥氏体钢和铬镍奥氏体钢）；合金铸铁类堆焊金属：镍基堆焊金属；钴基堆焊金属；铜基堆焊金属；碳化物复合材料堆焊金属；喷熔用自熔性合金（包括铁基、镍基、钴基和含碳化钨自熔性合金）。

2.5 铁基堆焊合金

（1）珠光体钢堆焊金属

珠光体钢堆焊金属含碳量一般在 0.5% 以下，含合金元素总量在 5% 以下。以 Mn、Cr、Mo、Si 为主要合金元素。在焊后自然冷却时，堆焊金属的金相组织以珠光体为主，包括一部分索氏体和屈氏体，故称珠光体钢堆焊金属。其硬度为 HRC 20～38。当合金元素含量偏高或冷却速度较大时，能产生部分马氏体组织，这时硬度增高。

珠光体钢堆焊金属多在焊态使用，也可以通过热处理改善性能。该堆焊金属的特点是：焊接性能优良，具有中等的硬度和一定的耐磨性，冲击韧性好，易机械加工，价格便宜。主要用于如下几个方面：在堆焊修复中用于堆焊耐磨层之前的恢复母体尺寸层堆焊；用于过渡层（或称缓冲层）堆焊。在少数情况下也可用于对堆焊层硬度值要求不高的零件的堆焊。但从经济上考虑，用这种耐磨性不高的材料作抗磨堆焊层是不合理的。珠光体钢堆焊材料的成分、硬度及具体应用见表 4.17-4、表 4.17-5 及表 4.17-6。

表 4.17-4 珠光体堆焊焊条的成分、硬度与用途

序号	牌号	国标型号（GB）	堆焊金属化学成分（质量分数）/%						堆焊金属硬度 HRC	用途
			C	Si	Mn	Cr	Mo	其他		
1	D102	EDPMn2－03	≤0.20	—	≤3.50	—	—	—	≥22	用于堆焊或修复低碳钢、中碳钢及低合金钢磨损件的表面。如车轮、齿轮、轴类等。拖拉机辊子、链轮牙、链轨板、履带板、搅拌机叶片，碳钢道岔等
2	D106 D107	EDPMn2－16 EDPMn2－15	≤0.20	—	≤3.50	—	—	—	≥22	
3	D112	EDPCrMo－A1－03	≤0.25	—	—	≤2.00	≤1.50	≤2.00	≥22	
4	D126 D127	EDPMn3－16 EDPMn3－15	≤0.20	—	≤4.20	—	—	—	≥28	
5	D132	EDPCrMo－A2－03	≤0.50	—	—	≤3.00	≤1.50	—	≥30	
6	D146	EDPMn4－16	≤0.20	—	≤4.50	—	—	≤2.00	≥30	
7	D156		≈0.10	≈0.05	≈0.70	≈3.20	—	—	≈31	适用于轧钢机零件的堆焊、如槽滚轧机、铸钢的大齿轮、拖拉机驱动轮、支重轮和链轨节
8	D202A		≤0.15	0.2～0.4	0.5～0.9	1.8～2.3	—	—	26～30	

注：堆焊金属化学成分余量为 Fe。

表 4.17-5 珠光体钢堆焊药芯焊丝的成分、硬度及用途

序号	焊丝种类	牌号	堆焊金属化学成分（质量分数）/%						堆焊金属硬度 HV	用途
			C	Si	Mn	Cr	Mo	V		
1	MAG 药芯焊丝	FLUXOFIL50	0.17	0.45	1.4	0.70	—	—	（HB）225～275	用于零件恢复尺寸层堆焊、过渡层堆焊和受金属间磨损的中等硬度零件表面层堆焊。如轴、惰轮、滑轮、链轮、连接杆等
2		FLUXOFIL51	0.20	0.16	1.5	1.25	—	—	（HB）275～325	
3		A－250	0.17	0.42	1.21	1.63	0.50	—	290	
4		A－350	0.23	0.42	1.48	2.70	0.20	—	378	
5		AS－H250	0.06	0.48	1.54	1.17	0.40	—	279	
6		AS－H350	0.10	0.65	1.56	1.66	0.49		384	
7	自保护弧焊药芯焊丝	YD176Mn－2[3]	0.12～0.18	0.9～1.2	1.7～2.1	0.55～0.85	0.3～0.5		（HRC）32～36	
8		GN－250	0.18	0.15	1.4	0.57	0.14		276	
9		GN－300	0.23	0.26	1.42	1.10	0.21		331	
10		GN－350	0.26	0.16	1.42	1.25	0.24		360	



续表 4.17-5

序号	焊丝种类	牌　号	堆焊金属化学成分（质量分数）/%						堆焊金属硬度 HV	用　途
			C	Si	Mn	Cr	Mo	V		
11	埋弧堆焊药芯焊丝、焊带	FLUXOCORD50（焊剂 OP－122）	0.14	0.70	1.6	0.6	—	—	220～270	用于零件恢复尺寸层堆焊、过渡层堆焊和受金属间磨损的中等硬度零件表面层堆焊。如轴、惰轮、滑轮、链轮、连接杆等
12		FLUXOCORD51（焊剂 OP－122）	0.18	0.70	1.7	1.1	—	—	250～350	
13		S－250/50	0.05	0.67	1.72	0.72	0.48	—	248	
14		S－300/50	0.08	0.84	1.55	0.93	0.47	0.12	300	
15		S－350/50	0.10	0.66	2.04	1.96	0.54	0.17	364	
16		HYB117Mn[3]	≥0.1		1.20～1.60	1.5～2.5		其他～2	（HRC）≈30	

注：堆焊金属化学成分余量为 Fe。

表 4.17-6　珠光体钢带极埋弧堆焊堆焊层成分、硬度及用途

序号	规格/mm	焊剂/带极牌号	堆焊层金属化学成分（质量分数）/%					堆焊层数	堆焊金属硬度 HV	用　途
			C	Si	Mn	Cr	Mo			
1	50×0.4	BH－200/SH－10	0.08	0.57	1.61	0.50	0.20	3	190～220	各种辊子及硬堆焊层打底焊
2	50×0.4	BH－260/SH－10	0.08	0.65	1.61	0.80	0.30	3	240～260	各种辊子及离心铸造模等的堆焊
3	50×0.4	BH－360/SH－10	0.12	0.35	0.65	2.22	1.2（V0.12）	3	310～360	连铸机夹送辊、送料台辊子

注：1. 带极 SH－10 的成分（%）为：C 0.05、Si 0.03、Mn 0.35、P 0.018、S 0.005、其余为 Fe。
2. 堆焊金属化学成分余量为 Fe。

珠光体钢堆焊金属采用的工艺方法主要有手工电弧堆焊和熔化极自动堆焊，包括药芯焊丝 MAG 堆焊，药芯焊丝自保护堆焊，药芯焊丝埋弧堆焊和带极埋弧堆焊，个别情况下采用电渣堆焊。由于熔深大小对这种材料的堆焊并不重要，故低稀释率的工艺方法如氧－乙炔焰堆焊、TIG 堆焊等，因劳动生产率偏低，成本高而极少采用。但要注意这类合金对稀释率和冷却速度都很敏感，能引起性能较大的变化，故焊接参数仍应严格控制。同时为保持堆焊层硬度，层间温度不宜过高。

（2）马氏体钢堆焊金属

马氏体钢堆焊金属根据它们的碳和合金元素的含量以及性能、用途的不同，又可分为普通马氏体钢；高速钢、工具钢和高铬马氏体钢三大类。

1）普通马氏体钢堆焊金属　普通马氏体钢堆焊金属的含碳量一般在 0.1%～1.0% 范围内，个别也有的高达 1.5%。合金元素总含量约 5%～12%。加入 Mo、Mn、Ni 能提高淬硬性，促使马氏体、贝氏体形成。加入 Cr、Mo、W、V 能形成抗磨的碳化物。而 Mn、Si 能改善焊接性能，焊后组织为马氏体，有时也会出现少量的珠光体、屈氏体、贝氏体和残余奥氏体。堆焊层硬度 HRC25～65，主要取决于含碳量和转变成马氏体的数量，冷却速度和合金含量对马氏体转变程度的影响和稀释率对硬度的影响都很大。根据含碳量不同可分为低碳、中碳和高碳马氏体钢堆焊金属。

低碳马氏体钢堆焊金属的含碳量小于 0.30%，其堆焊层组织为低碳马氏体，有时也含一定的珠光体，硬度为 HRC 25～50，低碳马氏体钢堆焊金属的抗裂性好，堆焊前一般不用预热；硬度适中，有一定的耐磨性；延性好，能承受中度冲击；线胀系数较小，开裂和变形倾向较小。这类金属应用范围较广，可代替珠光体、贝氏体焊条，还可部分代替高锰钢焊条，但由于耐磨料磨损性能较差，主要用于金属间磨损零件的修复或用作过渡层堆焊材料。

中碳马氏体钢堆焊金属的含碳量在 0.30%～0.60% 范围内。堆焊金属组织为片状马氏体，有时也含有少量低碳马氏体，珠光体和残余奥氏体，硬度为 HRC38～55，具有良好的抗压强度和较好的耐磨性和中等抗冲击能力，适用于抗中等冲击磨料磨损零部件的堆焊。开裂倾向比低碳马氏体大，堆焊前一般应预热到 250～350℃。

高碳马氏体钢堆焊金属的含碳量为 0.6%～1.0%，也有的高达 1.5%。堆焊金属显微组织是片状马氏体和残余奥氏体，如果含碳量和含铬量都较高，由于残余奥氏体数量增加，韧性可以提高。堆焊金属硬度高达 HRC60 左右，具有好的抗磨料磨损性能，但耐冲击能力较差。适用于堆焊不受或受轻度冲击载荷的低应力磨料磨损的零部件。焊接时容易产生裂纹，所以一般应预热 350～400℃以上，多数是在焊态使用，如果需要机械加工，则应先行退火处理，将硬度降到 HRC25～30，加工后再淬火把硬度提高到 HRC 50～60。

普通马氏体钢堆焊材料的成分、硬度及用途见表 4.17-7～表 4.17-11。



表 4.17-7　低碳马氏体钢堆焊焊条的成分、硬度及用途

序号	牌号	堆焊金属化学成分（质量分数）/%						堆焊金属硬度 HRC	用途
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V		
1	广堆1#	0.13	0.87	4.0	—	5.1	0.16	47	各种辊子、齿轮、轴、销堆焊
2	广堆2#~4#	0.20~0.24	0.23~0.68	0.30~5.4	4.0~5.5	0~2.3	0.13~0.21	49~51	各种辊子、齿轮、轴、销堆焊
3	耐磨4#	≈0.1	Si+Mn1.2~2.4		5.5~6.5	—	其他≤2	40~45	齿轮轴类等堆焊
4	ZD-16#	0.10~0.20	0.50~2.0	1.0~3.0	Cr+W5.0~10.0	Ni1.0~3.0	其他≤5	40~45	热轧辊类堆焊

注：1. 序号1~4为非标产品，1#、2#为广州焊条厂研制，3#、4#为哈尔滨焊接研究所研制。
2. 堆焊金属化学成分余量为Fe。

表 4.17-8　中碳马氏体钢堆焊焊条的成分、硬度及用途

序号	牌号	国标型号（GB）	堆焊金属化学成分（质量分数）/%							堆焊金属硬度 HRC	用途
			C	Si	Mn	Cr	Mo	V	其他元素总量		
1	D172	EDPCrMo-A3-03	≤0.50	—	—	≤2.50	≤2.50	—	—	≥40	齿轮、挖泥斗、拖拉机刮板、铧犁、矿山机械磨损件堆焊
2	D167	EDPMn6-15	≤0.45	≤1.00	≤6.50	—	—	—	—	≥50	大型推土机、动力铲滚轮、汽车环链、农业、建筑磨损件的堆焊
3	D212	EDPCrMo-A4-03	0.30~0.60	—	—	≤5.00	≤4.00	—	—	≥50	齿轮、挖斗、矿山机械磨损件的堆焊
4	D217A	EDPCrMo-A3-15	≤0.50	—	—	≤2.50	≤2.50	—	—	≥40	冶金轧辊、矿石破碎机部件、挖掘机斗齿的堆焊
5	D237	EDPCrMoV-A1-15	0.30~0.60	—	—	8.00~10.00	≤3.00	0.50~1.00	≤4.00	≥50	水力机械、矿山机械磨损件的堆焊

注：堆焊金属化学成分余量为Fe。

表 4.17-9　高碳马氏体钢堆焊焊条的成分、硬度及用途

序号	牌号	国标型号（GB）	堆焊金属化学成分（质量分数）/%						堆焊金属硬度 HRC	用途
			C	Si	Mn	Cr	Mo	V		
1	D202B		0.50~0.70	0.30~0.50	0.60~1.00	4.40~5.00	—	—	54~58	齿轮、挖斗、矿山机械磨损表面堆焊
2	D207	EDPCrMnSi-15	0.50~1.00	≤1.00	≤2.50	≤3.50	其他≤1.00		≥50	推土机零件、螺旋浆堆焊
3	D227	EDPCrMoV-A2-15	0.45~0.65	—	—	4.00~5.00	2.00~3.00	4.00~5.00	≥55	掘进机滚刀、叶片堆焊
4	D246	EDPCrSi-B	≤1.00	1.50~3.00	≤0.80	6.50~8.50	B0.50~0.90	—	≥60	矿山、工程、农业、制砖、水泥、水力等机械的易磨损件堆焊

注：堆焊金属化学成分余量为Fe。



表4.17-10　普通马氏体钢堆焊药芯焊丝、焊带的成分、硬度及用途

序号	名　称	牌号 焊丝/焊剂	堆焊金属化学成分（质量分数）/%						堆焊金属硬度HV	用　途
			C	Si	Mn	Cr	Mo	V		
1	CO_2气体保护堆焊药芯焊丝	A－450	0.19	0.66	1.52	1.83	0.60	—	445	履带辊、链轮、惰轮、轴、销、链带、搅叶堆焊
2	CO_2气体保护堆焊药芯焊丝	A－600	0.38	0.32	2.76	6.16	3.25	—	628	挖泥船泵壳，输送螺旋推土刀堆焊
3	CO_2气体保护堆焊药芯焊丝	YD212－1	0.30～0.60	—	—	≤5.00	≤4.00	—	HRC ≥50	齿轮、挖斗、矿山机械堆焊
4	CO_2气体保护堆焊药芯焊丝	YD247－1	≤0.70	2.00～3.00	—	7.00～9.00	—	—	HRC 55～60	各种受磨损机件表面堆焊
5	CO_2气体保护堆焊药芯焊丝	FLUXOFIL66	1.2	—	1.0	6.0	1.2	—	57～62	碾辊、螺旋运输机、刮板刀堆焊
6	自保护堆焊药芯焊丝	GN450	0.45	0.14	1.80	2.65	0.49	—	480	驱动链轮、轴、销、搅叶、链带、辊轮、齿轮堆焊
7	自保护堆焊药芯焊丝	GN700	0.65	0.89	1.27	5.92	1.61	—	675	堆土机刀、搅叶、割刀、泵壳、搅拌筒堆焊
8	自保护堆焊药芯焊丝	YD386－2	0.06～0.14	0.15～0.45	1.20～1.60	2.00～2.60	≤0.50	—	HRC 42～46	拖拉机、挖土机辊子、惰轮、起重机轮、链轮、传送器、吊车轮、离合器凸轮等的堆焊
9	埋弧堆焊药芯焊丝、焊带 焊丝	S400/50	0.12	0.80	2.04	1.99	0.54	0.19	400	推土机铲土机的引导轮、支重轮、惰轮、链轨节堆焊
10	埋弧堆焊药芯焊丝、焊带 焊丝	S450/50	0.20	0.60	1.50	2.80	0.80	0.30	450	推土机铲土机的引导轮、支重轮、惰轮、链轨节堆焊
11	埋弧堆焊药芯焊丝、焊带 焊丝	YD107－4	0.30～0.55	0.10～0.50	1.30～1.95	—	0.35～0.85	—	HRC ≥24	推土机铲土机的引导轮、支重轮、惰轮、链轨节堆焊
12	埋弧堆焊药芯焊丝、焊带 焊丝	YD137－4	0.25～0.55	≤0.40	0.95～1.45	2.10～2.70	0.25～0.55	—	HRC ≈36	推土机铲土机的引导轮、支重轮、惰轮、链轨节堆焊
13	埋弧堆焊药芯焊丝、焊带 焊丝	S600/80	0.25	0.90	1.55	7.0	4.2	W0.45	580	辊碾机辊子，高炉料钟堆焊
14	埋弧堆焊药芯焊丝、焊带 焊丝	HYD047/HJ107	≤1.7	—	Ni≤3.0	4.0～7.0	1.5～3.0	其他 ≤10.0	HRC ≥55	辊压机挤压辊表面堆焊
15	埋弧堆焊药芯焊丝、焊带 焊带	HYD616Nb/HJ151	1.00～2.00	Si＋Nb 5.5～7.0	0.30～0.50	10～15	—	其他 ～2%	HRC ≥55	水泥碾辊、磨煤机碾辊，铸造式磨辊等表面堆焊
16	埋弧堆焊药芯焊丝、焊带 焊带	FLUXOMAX66/OP70FB	1.2	—	1.0	6.0	1.2	—	HRC 57～62	碾辊、螺旋运输机、挖掘铲等堆焊

注：堆焊金属化学成分余量为Fe。

表 4.17-11 普通马氏体钢实心带极埋弧堆焊堆焊层成分、硬度及用途

序号	名称	焊剂/带极牌号	堆焊金属化学成分（质量分数）/%							堆焊金属硬度 HV	用途
			层数	C	Si	Mn	Cr	Mo	V		
1	堆焊带极（50 mm×0.4 mm）	BH-400/SH-10	1	0.13	0.31	0.56	3.26	0.77	0.11	345	各种辊子堆焊
			2	0.13	0.34	0.55	4.02	0.96	0.12	377	
			3	0.16	0.35	0.56	4.15	0.99	0.12	392	
2	堆焊带极（50 mm×0.4 mm）	BH-450/SH-10	3	0.16	0.43	0.56	5.45	0.95	0.13	430~480	各种辊子堆焊

注：堆焊金属化学成分余量为 Fe。

普通马氏体钢堆焊金属采用的工艺方法主要是手工电弧堆焊和熔化极自动堆焊，包括药芯焊丝 MAG 堆焊，自保护药芯焊丝堆焊，药芯焊丝埋弧堆焊以及带极埋弧堆焊。普通马氏体钢的手工电弧堆焊时，当母材为低碳钢时，堆焊低碳马氏体焊条和中碳马氏体焊条可以不预热；堆焊高碳马氏体焊条则应预热 200~300℃以上。对于抗裂性差的低合金钢母材和中、高碳钢母材，则应视焊条与母材的不同、预热 150~350℃。对于高碳马氏体堆焊金属的堆焊件有时采用 250~350℃后热处理。

2）高速钢及工具钢堆焊金属　高速钢和工具钢堆焊金属都属马氏体钢类型，所以焊接性、硬度等方面都相近似。工具钢根据用途不同，又可分热工具钢和冷工具钢。

高速钢属热加工工具钢中的一个类型。其淬火回火组织为马氏体加碳化物。该合金钢中的 W、Mo 含量较高因而具有较高的热硬性（即高温硬度）和红硬性（即不使室温硬度发生下降变化的最高加热温度）。高速钢的红硬性达 600℃，无论常温或高温都有很好的耐磨料磨损性能，主要用于双金属切削工具、热剪机剪刀刃等。高速钢中加少量钴能进一步提高热硬性和红硬性，并能显著提高耐用寿命。高速钢堆焊材料的成分硬度及用途见表 4.17-12。

表 4.17-12 高速钢堆焊焊条的成分、硬度及用途

序号	名称或牌号	国标型号（GB）	堆焊金属化学成分（质量分数）/%						堆焊金属硬度 HRC	用途
			C	Cr	W	Mo	V	其他元素总量		
1	D307	EDD-D-15	0.70~1.00	3.80~4.50	17.00~19.50	—	1.00~1.50	≤1.50	≥55	金属切削刀具、木工刀具、热剪刀刃、冲头、冲裁阴模等的堆焊
2	Mo9 型 GRIDUR36 电焊条		0.90	4.0	1.7	8.0	1.1~1.2	—	≥62	
3	6-5-4-2 型电焊条		0.90	4.0	6.0	5.0	2.0	—	61	
4	D417	EDD-B-15	0.50~0.90	3.0~5.0	1.0~2.5	5.0~9.5	0.8~1.3	Si≤0.80 Mn≤0.60 其他≤1.00	≥55	齿轮破碎机、叶片、高炉料钟，各种冲压模具的堆焊
5	D427		~0.8	~11	Mn~13	Ni~2	~2	—	≥40	轧钢、炼钢装入机吊牙、双金属热剪刀堆焊
6	D437		~0.8	~15	—	Ni~4	~3	—	40~42	轧钢、炼钢装入机吊牙、双金属热剪刀堆焊

注：1. 表中硬度值为焊后状态，焊后经 540~560℃回火，硬度值可提高 HRC2~4。
2. 堆焊金属化学成分余量为 Fe。

热工具钢即热加工工具钢堆焊金属含碳量比高速钢堆焊金属低些。除具有较高的高温硬度外，还有较高的强度和冲击韧性，以抵抗锻造或轧制中的冲击载荷。此外还具有较高的抗冷热疲劳性。有时还要求具有高的高温抗氧化性和耐磨性。其中用得最多的是热作模具钢堆焊材料和热轧辊钢堆焊材料。它们的成分及硬度及用途见表 4.17-13 和表 4.17-14。这些堆焊材料中有的耐冷热疲劳性较好，但耐磨性稍差，如 25Cr5VMoSi，反之，有的耐磨性好，耐冷热疲劳性欠佳，如 3Cr2W8。可根据工件的主要失效形式来选择堆焊材料。近年来开发的材料均向着二者性能兼优的方向发展，如 CrWNiMnSi系堆焊材料，具有优良的综合性能，这是热工具钢堆焊材料的发展方向。

冷工具钢要求具有较高的常温硬度和抗金属间磨损的性能。它的成分，硬度及用途见表 4.17-15。



表 4.17-13　热作模具钢堆焊材料的成分、硬度及用途

序号	名称或牌号	国标型号（GB）	堆焊金属化学成分（质量分数）/%								堆焊金属硬度 HRC	用　途
			C	Cr	Mo	W	V	Mn	Si	其他		
1	D337	EDRCrW－15	0.25～0.55	2.00～3.50	—	7.00～10.00	—	—	—	≤1.0	≥48	热锻模及热轧辊堆焊制造与修复
2	D392，D397	EDRCrMnMo－03 EDRCrMnMo－15	≤0.60	≤2.00	≤1.00	—	—	≤2.50	≤1.00	—	≥40	热锻模及热轧辊堆焊制造与修复
3	D406	EDRCrMoWCo－A	≤0.50	≤6	≤5	≤10	≤2	≤2.0	≤2.0	Co≤12 其他≤2.0	≈50	耐高温的刀具、模具堆焊
4	CO_2 气保护堆焊药芯焊丝 YD337－1		0.25～0.55	2.0～3.5	—	7.0～10.0	—	—	—	—	≥48	锻模堆焊制造及修复

注：堆焊金属化学成分余量为 Fe。

表 4.17-14　热轧辊钢堆焊材料的成分、硬度及用途

序号	名称或牌号	堆焊金属化学成分（质量分数）/%							堆焊金属硬度 HRC	用　途
		C	Cr	W	Mo	Mn	Si	V		
1	13Cr14Ni3Mo 埋弧堆焊药芯带极	0.13	14.4	Ni3.3	0.6	0.7	0.25	—	40～45	大型板坯连铸机导辊堆焊
2	4Cr4W8V 埋弧堆焊焊丝（3Cr2W8＋焊剂过渡部分合金元素）	0.34	3.68	7.17	—	0.32	0.33	0.31	55	轧机卷取机助卷辊、夹送辊堆焊
3	25Cr3MoMnVA 埋弧堆焊焊丝	0.20～0.28	3.10～3.50	—	1.45～1.65	1.10～1.40	0.15～0.35	0.48～0.60	（HB）320～350（560℃回火后 430～450）	热轧开坯辊堆焊
4	25Cr5VMoSi 药芯焊丝	～0.25	～5	—	～1	—	～1	～0.5	42～46	型材轧辊堆焊
5	HYD057 埋弧无缝药芯焊丝	0.20～0.50	4.0～6.0	—	0.5～1.5	其他≤6.0	—	≤1.0	44～46（550℃回火后 47～49）	热轧辊、开坯辊、支撑辊的堆焊
6	CrWNiMnSi 埋弧堆焊药芯焊丝	0.10～0.40	Cr＋W 8～15		Ni 1.00～5.00	1.00～3.00	0.50～2.00	其他≤5.00	≥48（550℃回火后≥50）	热轧辊，轧机卷取机助卷辊夹送辊，热锻模堆焊
7	YD207A－4 埋弧堆焊药芯焊丝	0.40～0.70	4.80～6.20	—	0.80～1.40	2.10～2.90	0.40～0.95	—	≥40	钢轧辊、支撑辊、校直辊，挖土机辊的堆焊
8	YD327A－4 埋弧堆焊药芯焊丝	0.35～0.55	4.80～6.20	0.90～2.00	0.80～1.40	1.20～1.90	0.40～0.90	0.90～1.50	≥50	钢轧辊、热轧工作辊、支撑辊、夹送辊、连铸机辊、校直辊的堆焊
9	D650 手工堆焊焊条	≤1.50	≤7.0	≤6.0	≤5.5	≤2.5	≤1.0	≤6.0	≈57	轧辊、风机叶轮、油田钻机扶正器等堆焊

注：堆焊金属化学成分余量为 Fe。

表 4.17-15 冷工具钢堆焊材料的成分、硬度及用途

序号	名称或牌号	国标型号（GB）	堆焊金属化学成分（质量分数）/%								堆焊金属硬度 HRC	用途
			C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	其他元素总量		
1	D322 D327	EDRCrMoWV－A1－03 EDRCrMoWV－A1－15	≤0.50	—	—	≤5.00	7.00～10.00	≤2.50	≤1.00	—	≥55	各种冲模及切削刀具堆焊
2	D327A	EDRCrMoWV－A2－15	0.30～0.50	—	—	5.00～6.50	2.00～3.50	2.00～3.00	1.00～3.00	—	≥50	各种冲模及切削刀具堆焊
3	D027		～0.45	～2.80	—	～5.50	—	～0.50	～0.50	—	≥55	冲裁及修边模堆焊制造及修复
4	D036		0.50～0.70	0.60～0.80	0.60～0.90	5.00～6.00	—	1.50～2.00	～0.50	—	≥55	冲模堆焊制造及修复
5	D317	EDRCrMoWV－A3－15	0.70～1.00	—	—	3.00～4.00	4.50～6.00	3.00～5.00	1.50～3.00	≤1.50	≥50	冲模及一般切削刀具堆焊
6	D317A		0.30～0.80	0.30～0.60	0.50～1.00	3.00～4.00	6.00～8.00	2.00～3.50	1.50～2.50	—	58～62	齿辊、破碎机、风机叶片、高炉料钟堆焊
7	D386		≤0.60	—	—	≤3.00	≤5.00	—	—	≤3.00	≥50	冲模、模具、轧辊堆焊
8	D600		≤0.70	≤1.5	≤1.0	≤9.00	—	≤1.5	—	—	约 55	冲裁修边模堆焊
9	YD397－1 CO_2 气保护堆焊药芯焊丝		≤0.60	—	1.50～2.50	5.00～7.00	—	1.50～2.50	—	—	55～60	冷轧辊、冷锻模的堆焊

注：堆焊金属化学成分余量为 Fe。

高速钢和冷、热工具钢常用的堆焊方法是手工电弧焊，部分热锻模和冷工具钢用药芯焊丝 CO_2 气体保护堆焊，近年来，脉冲氩弧焊在模具修复中应用也较广泛，而对于修复或制造双金属热轧辊用得最多的是丝极埋弧堆焊，药芯带极和实芯带极埋弧堆焊的用量也逐年增多。

由于高速钢和冷、热工具钢一般碳和合金元素含量都较高，组织属马氏体类型，硬度也较高，它们的焊接性和切削加工性一般都较差，裂纹倾向较大，因此在进行这些材料堆焊时有一些需共同注意的问题。

① 焊前处理　有的材料，如高速钢，在堆焊大件时，焊前需进行软化退火。退火工艺随堆焊材料而异，如 Mo9 型高速钢焊条，需经 850℃×2 h，炉内冷却，而 6－5－4－2 型焊条则需经 700～840℃×2 h 炉内冷却的软化退火处理。

② 焊前预热　这类材料堆焊前一般都需进行预热。根据工件大小，母材牌号选择不同的预热温度，一般在 300～500℃之间，小工件有时可用局部预热，但绝大多数需整体预热，且需保温一定时间，使工件整体温度均匀。

③ 堆焊过渡层（缓冲层）　当母材含 C 量较高时，为了减小裂纹倾向，可堆焊 1～2 层硬度较低、塑性较好的过渡层，如模具钢堆焊厚度较大的裂损部位，可先堆焊一层 Cr19Ni8Mn7、Cr25Ni13 或珠光体类材料的过渡层；热轧辊堆焊时也常先堆焊 1～2 层 HRc30 左右的珠光体钢缓冲层。

④ 堆焊工作层　堆焊工作层需连续进行，工件温度需保持不小于预热温度，如层间温度保持不住，可进行补充加热。

⑤ 焊后冷却　这类堆焊材料除了高速钢在堆焊小件时可空冷外，其余材料堆焊后一般均需缓冷，大件最好在炉中缓冷。

⑥ 焊后处理　这类堆焊材料焊后处理有两种类型，一类是为了消除部分残余应力，并可使马氏体软化，提高韧性的回火处理，如热轧辊、模具等的焊后处理，一般回火温度在 480～580℃之间不等；另一类是属于加工的需要和恢复材料本身性能的处理，如高速钢在焊后进行退火软化处理，经机械加工后再进行淬火，回火处理，最后可根据需要进行磨削加工，热处理参数根据高速钢堆焊材料成分而定。但必须指出高速钢、工具钢焊后不一定都要热处理。当必须热处理时，选择的堆焊金属必须能和母材经受同样的热处理制度。

3）高铬马氏体不锈钢　高铬马氏体不锈钢当含碳量较低时，可以是马氏体＋铁素体的半马氏体高铬钢或称半铁素体高铬钢。它的含铬量较高，一般均大于 12%，具有良好的耐腐蚀性和一定的高温抗氧化性。当 Si、C、B 含量较高时，还兼有优良的耐磨性，耐中温擦伤性能。主要用于中温（300～600℃）时耐金属间磨损，如中温中压阀门密封面堆焊，含钼含碳的 Cr13 型堆焊金属耐磨性较高，有一定的抗冲击能力，还在连铸机导辊、拉矫辊的堆焊、耐气蚀零件的堆焊中得到应用。高铬马氏体钢堆焊材料的成分、硬度及用途见表 4.17-16 和表 4.17-17。

高铬马氏体不锈钢的堆焊工艺方法主要是手工电弧焊，MIG 焊和丝极或带极埋弧焊。除小件堆焊在焊前不预热外，一般需要预热 150～300℃。焊后可以不进行处理。也可在 750～800℃退火软化。当加热至 900～1 000℃空冷或油冷后，可重新硬化。也可焊后通过不同的热处理获得不同的硬度。

（3）奥氏体钢堆焊金属

奥氏体钢堆焊金属大体可分成高锰奥氏体钢、铬锰奥氏体钢和铬镍奥氏体钢三种类型。

1）高锰奥氏体钢与铬锰奥氏体钢堆焊金属　高锰奥氏体钢简称高锰钢，成分为 C 1% ~ 1.4%，Mn 10% ~ 14%，高锰钢经水韧处理（1 000 ~ 1 100℃水淬）后，能获得单一奥氏体组织，具有高的韧性和冷作硬化性能，是强烈冲击条件下抗磨料磨损的良好材料。由于加工硬化快，切削加工困难，因此几乎全部以铸件形式应用。如果高锰钢零件在其制造、使用和维修过程中需经受焊接或表面堆焊，则要求在其冶炼过程中严格控制硅、磷含量，以改善其焊接性。高锰钢堆焊金属与同成分母材具有相同特性，只是为了改善焊接性，堆焊金属中常添加少量 Cr、Ni、Mo 等元素。另外，为了防止碳化锰沉淀硬化引起的脆性，最好把高锰钢堆焊金属的含碳量降到 0.7%左右。铬锰奥氏体钢堆焊金属与高锰奥氏体钢堆焊金属具有相同的金相组织和十分相近的焊后硬度和冷作硬化效果，其用途也基本相同，只是焊接性更为优良，常在重要的高锰钢零件修复中采用。铬锰奥氏体堆焊金属，又可分为低铬和高铬两类。低铬型铬锰奥氏体钢含铬量不超过 4%，含锰 12% ~ 15%，还有少量镍和钼。而高铬型铬锰奥氏体钢堆焊金属，含铬 12% ~ 17%，含锰约 15%。

高锰钢和铬锰奥氏体钢堆焊金属，具有高的韧性和在冲击磨料磨损条件下表面冷变形硬化的特性。堆焊层焊后硬度为 HB200 ~ 250，这样的堆焊层对低应力磨料磨损很不耐磨。而在重冲击时，经变形加工硬化后，表层硬度可达 HB450 ~ 550，耐磨性大大提高。如在破碎岩石的锤头上或在含有巨砾的土壤中从事挖掘工作的堆焊层，由于表面产生了变形硬化，使耐磨性变得很好。因此，这类钢堆焊金属适用于伴有冲击作用的金属间磨损和磨料磨损，在矿山开采、矿石加工以及钢轨道岔制造等方面获得广泛应用，也用于修补奥氏体锰钢铸件。而高铬锰奥氏体堆焊金属，由于高铬阻止了碳化物的脆化作用，而且还具有耐腐蚀性，抗气蚀性、抗氧化性和中温下的抗擦伤性，故适用于水轮机耐气蚀堆焊和中温高压阀门密封面的堆焊。但由于含碳量高、耐晶间腐蚀性不好。

由于韧性高，奥氏体钢堆焊层产生开裂和剥落的机率小，故可作为大厚度的恢复尺寸堆焊。

高锰钢在 260 ~ 320℃时加热会脆化，因而工作温度不能超过 200℃。高铬锰奥氏体钢堆焊层的工作温度可以比 200℃高，有的可高达 600℃。高锰奥氏体钢和铬锰奥氏体钢堆焊金属的成分、硬度和用途见表 4.17-18。

表 4.17-16　高铬马氏体不锈钢堆焊焊条成分、硬度及用途

序号	名称	牌号	国标牌号（GB）	堆焊金属化学成分（质量分数）/%								堆焊金属硬度 HRC	用　途
				C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	其他		
1	Cr13 型	G202 G207	E410 - 16 E410 - 15	≤0.12	≤0.90	≤1.0	11.0 ~ 13.5	≤0.7	≤0.75	Cu ≤0.75	—	—	耐蚀、耐磨表面堆焊
2	Cr13 型	G217	E410 - 15	≤0.12	≤0.90	≤1.0	11.0 ~ 13.5	≤0.7	≤0.75	Cu ≤0.75	—	—	耐蚀、耐磨表面堆焊
3	1Cr13Ni 型	D287		≤0.15	—	—	12.0 ~ 16.0	4.0 ~ 6.0	—	—	≤2.00	HV 400	水泵、水轮机过流部件堆焊
4	1Cr13 型	D502 D507	EDCr - A1 - 03 EDCr - A1 - 15	≤0.15	—	—	10.00 ~ 16.00	—	—	—	≤2.50	≥40	工作温度 ≤ 450℃ 阀门、轴等堆焊
5	1Cr13 型	D507Mo	EDCr - A2 - 15	≤0.20	—	—	10.00 ~ 16.00	≤6.00	≤2.50	≤2.00	≤2.50	≥37	≤ 510℃ 的阀门密封面堆焊，建议与 D577 配成摩擦副使用
6	1Cr13 型	D507MoNb	EDCr - A1 - 15	≤0.15	—	—	10.00 ~ 16.00	—	≤2.50	Nb ≤0.50	≤2.5	≥37	≤ 450℃ 的中低压阀门密封面堆焊
7	2Cr13 型	D512 D517	EDCr - B - 03 EDCr - B - 15	≤0.25	—	—	10.00 ~ 16.00	—	—	—	≤5.0	≥45	螺旋输送叶片、搅拌机浆，过热蒸汽用阀件
8	2Cr13Mn 型	D516M D516MA	EDCrMn - A - 16	≤0.25	≤1.00	6.00 ~ 8.00	12.00 ~ 14.00	—	—	—	—	38 ~ 48	≤ 450℃ 的 25 号铸钢及高中压阀门密封面堆焊
9	2Cr13Mn 型	D516F	EDCrMn - A - 16	≤0.25	≤1.00	8.00 ~ 10.00	12.00 ~ 14.00	—	—	—	—	35 ~ 45	≤ 450℃ 的 25 号铸钢及高中压阀门密封面堆焊

注：堆焊金属化学成分余量为 Fe。



表 4.17-17　高铬马氏体不锈钢堆焊焊丝、带极的成分、硬度及用途

序号	堆焊材料名称	牌号	熔敷金属化学成分（质量分数）/%				堆焊金属硬度 HRC	用途
			C	Cr	Ni	Mo		
1	00Cr13Ni4Mo 焊丝	THERMANIT13/04	0.03	13	4.5	0.50	~38	耐蚀耐磨堆焊、蒸汽透平耐气蚀堆焊
2	0Cr14NiMo 药芯带极	—	0.08	14	1.5	1.0	~30	连铸机辊子堆焊，≤450℃阀门堆焊
3	15Cr14Ni3Mo 药芯带极	—	0.13	14.4	3.3	0.6	36~42	连铸机辊子堆焊，≤450℃阀门堆焊
4	0Cr17 焊丝、带极	THERMANIT17	0.07	17.5	—	—	24	工作在≤450℃的蒸汽、燃气中的部件的堆焊
5	1Cr13Ni4Mo 药芯带极	Fluxomax21CrNi	0.08	13.5	3.6	Mo1.2 Mn1.2	38~43	活塞杆、液压缸、连铸辊堆焊
6	4Cr17Mo 焊丝及带极	THERMANIT1740	0.38	16.5	—	1.1	48	热轧辊、压床冲头、心棒堆焊
7	1Cr13 焊丝	HICr13	0.12	11.50~13.50	Si0.50	Mn0.60	≈40	≤450℃的碳钢、合金钢或合金钢的轴及阀门堆焊
8	1Cr13 自保护药芯焊丝	YG207-2	≤0.12	11.0~13.5	≤0.60	Mn≤1.0 Si≤0.90	—	耐蚀、耐磨件的表面堆焊
9	15Cr13 自保护药芯焊丝	YD502-2 YD507-2	≤0.15	10.0~16.0	—	—	≥40	≤450℃的碳钢、合金钢或合金钢的轴及阀门堆焊
10	25Cr13 自保护堆焊药芯焊丝	YD517-2	≤0.25	10.0~16.0	—	—	≥45	碳钢或低合金钢的轴、过热蒸汽用阀件，搅拌机桨、螺旋输送机叶片的堆焊
11	0Cr16Ni6Mo CO_2 气保护药芯焊丝	YG317-1	≤0.08	15.5~17.5	5.0~6.5	0.3~1.5	Mn≤1.5 Si≤0.90	耐蚀、耐磨件表面堆焊

注：焊丝或带极化学成分余量为 Fe。

表 4.17-18　高锰奥氏体钢和铬锰奥氏体钢堆焊材料的成分、硬度及用途

序号	名称	牌号	国标型号（GB）	堆焊金属化学成分（质量分数）/%							堆焊金属硬度 HB		用途
				C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	其他	堆焊后	加工硬化后	
1	高锰钢堆焊焊条	D256	EDMn-A-16	≤1.10	≤1.30	11.00~16.00	—	—	—	≤5.00	≥170	—	破碎机，高锰钢轨、戽斗、推土机等的抗冲击耐磨件堆焊
2	高锰钢堆焊焊条	D266	EDMn-B-16	≤1.10	0.30~1.30	11.00~18.00	—	≤2.50	—	≤1.00	≥170	—	破碎机、高锰钢轨、戽斗、推土机等的抗冲击耐磨件堆焊
3	高锰钢堆焊焊条	GRIDUR42		0.8	—	15	—	—	3.0	—	210	450	斗齿、粉碎机的锥体和滑瓦、道岔、筑路及矿山机械耐磨件堆焊



续表 4.17-18

序号	名称	牌　号	国标型号（GB）	堆焊金属化学成分（质量分数）/%							堆焊金属硬度 HB		用　途
				C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	其他	堆焊后	加工硬化后	
4	自保护药芯焊丝	GRIDURF - 41		1.0	—	15	3.0	—	3.0	—	200	450	斗齿、粉碎机的锥体和滑瓦、道岔、筑路及矿山机械耐磨件堆焊
5	铬锰奥氏体钢堆焊焊条	D276 D277	EDCrMn - B - 16 EDCrMn - B - 15	≤0.80	≤0.80	11.00 ~ 16.00	—	—	13.00 ~ 17.00	≤4.00	HRC ≥20	—	水轮机叶片导水叶、道岔、螺旋输送机件、推土机刀片、抓斗、破碎刃堆焊
6	铬锰奥氏体钢堆焊焊条	D567	EDCrMn - D - 15	0.50 ~ 0.80	≤1.30	24.00 ~ 27.00	—	—	9.50 ~ 12.50	—	≥210	—	≤350℃的中温中压球墨铸铁阀门密封面堆焊
7	铬锰奥氏体钢堆焊焊条	D577	DECrMn - C - 15	≤1.10	≤2.00	12.00 ~ 18.00	≤6.00	≤4.00	12.00 ~ 18.00	≤3.00	HRC ≥28	—	≤510℃阀门密封面堆焊。建议与 D507Mo 配成摩擦副使用
8	自保护药芯焊丝	GRIDURF - 48		0.5	—	15	—	0.8	15	—	250	450	水轮机叶片导水叶、道岔、螺旋输送机件、推土机刀片、抓斗、破碎刃堆焊
9	自保护药芯焊丝	YD256Ni - 2		0.5 ~ 0.8	0.35 ~ 0.65	15.0 ~ 17.0	1.5 ~ 1.9	—	2.7 ~ 3.3	—	HRC 5 ~ 15	HRC 44	破碎机辊、挖土机零件、破碎机锤或颚板的堆焊

注：堆焊金属化学成分余量为 Fe。

高锰奥氏体钢和铬锰奥氏体钢的堆焊工艺需注意以下几点。

焊前准备：用高锰奥氏体钢和铬锰奥氏体钢堆焊材料进行修复堆焊时，焊前必须把母材表面的加工硬化层打磨掉或用碳弧气刨去除；焊前一般不需预热；如果把高锰钢堆焊在碳钢或低合金钢母材上，由于稀释作用会出现马氏体的脆化区，并导致裂纹的产生，裂纹在重冲击作用下会扩展，最终引起堆焊层剥落。因此需预先堆焊诸如 Cr19Ni9Mn6 型的奥氏体不锈钢过渡层。（高铬锰奥氏体堆焊合金，因合金含量高，故不要堆焊过渡层。）

堆焊：尽量采用小线能量进行堆焊。因为高锰奥氏体钢和铬锰奥氏体钢堆焊金属的用途之一是对高锰钢铸件的铸造缺陷进行补焊和对磨损件进行修复，铸件在铸造过程中均经过了固溶处理（水韧处理），固溶状态的高锰钢处于介稳状态，介稳奥氏体由于受焊接热的影响，会因为局部相变而变脆；热影响区也会因为受焊接热的影响析出碳化锰，成为其破坏的主要原因；高锰钢铸件的奥氏体晶界有液化裂纹倾向；综上原因，为了减小焊接热带来的不利影响，希望采用小线能量的焊接方法和焊接工艺，并经常采用诸如跳焊法或把母材局部浸入水中施焊的强迫母材加快冷却速度的工艺措施。而对于不能提供快速加热和快速冷却的热规范的堆焊方法，如氧 - 乙炔焰堆焊，一般不被采用。

焊后处理：高锰钢堆焊层一般不需热处理。如果因过热产生了脆化，可用 1 010℃加热 2 h 后水淬，以恢复韧性，但必须保证不产生裂纹。

2）铬镍奥氏体钢堆焊金属　铬镍奥氏体钢其含铬量一般在 18%以上，含镍量在 8%以上，它具有优良的耐腐蚀性，抗高温氧化性。当合金中 Si、C、B 等元素含量较高时，还兼有优良的耐磨性，耐冷热疲劳性，耐气蚀性，耐中高温擦伤性能。含 Mn 5% ~ 8%铬镍锰奥氏体钢堆焊金属和含有相当高的铁素体含量的 Cr29Ni9 型堆焊金属，还具有高韧性，较高的冷作硬化性、抗气蚀性及耐磨性。因此，在铬镍奥氏体钢中有一类是单纯的耐腐蚀用钢，也就是一般通称的铬镍奥氏体钢，它们在化工设备中得到广泛的应用，比如铬



镍奥氏体不锈钢大面积丝极或带极堆焊已广泛在核容器、化工容器、管道制造中应用。另一类是除了具有耐腐蚀性外，还具有其他优良性能，如C、Si、B等元素含量较高的铬镍不锈钢堆焊金属还有优良的耐中、高温金属间磨损性能，主要用于阀门密封面的堆焊，又如Cr19Ni9Mn6型铬镍奥氏体堆焊金属和铁素体含量高的Cr29Ni9型堆焊金属抗气蚀性好，可用于水轮机过流部件耐气蚀堆焊。同时有好的抗热和抗高冲击的能力，可用于热冲击、热挤压工具堆焊，其中Cr19Ni9Mn6型焊条及焊丝是高锰钢焊接、高锰钢与碳钢焊接的常用焊接材料。由于抗冲击性不如高锰钢，而且价格较贵，所以主要作为在碳钢或低合金钢母材上堆焊合金铸铁时耐冲击的缓冲层，在堆焊高锰钢时作为提高熔合区塑性的过渡层。铬镍奥氏体钢堆焊材料的主要成分、硬度及用途见表4.17-19、表4.17-20和表4.17-21。

表 4.17-19　铬镍奥氏体钢堆焊焊条的成分、硬度及用途

序号	焊条名称	牌号	国标型号（GB）	堆焊金属化学成分（质量分数）/%								硬度 HB		用途
				C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	焊后	冷作硬化	
1	超低碳 19-10 型	A002 A002A	E308L-16 E308L-17	≤0.04	≤0.90	0.5~2.5	18.0~21.0	9.0~11.0	≤0.75	≤0.75	—	—	—	耐腐蚀层堆焊
2	超低碳 23-13Mo2 型	A042	E309MoL-16	≤0.04	≤0.90	0.5~2.5	22.0~25.0	12.0~14.0	2.0~3.0	≤0.75	—	—	—	耐腐蚀层或过渡层堆焊，如尿素合成塔衬里等
		A042Si		≤0.04	0.7~1.1	~1.3	~22.5	~13.5	~2.7	—	—	—	—	
3	超低碳 23-13 型	A062	E309L-16	≤0.04	≤0.90	0.5~2.5	22.0~25.0	12.0~14.0	≤0.75	≤0.75	—	—	—	耐腐蚀层或过渡层堆焊，如尿素合成塔衬里等
4	低碳 19-10 型	A102 A102A A102T A107	E308-16 E308-17 E308-16 E308-15	≤0.08	≤0.90	0.5~2.5	18.0~21.0	9.0~11.0	≤0.75	≤0.75	—	—	—	耐腐蚀层堆焊
5	低碳 19-10Mn4Mo 型	A172	E307-16	0.04~0.14	≤0.90	3.30~4.75	18.0~21.5	9.0~10.7	0.5~1.5	≤0.75	—	—	—	耐冲击腐蚀层或过渡层堆焊
6	低碳 18-12Mo2 型	A202 A207	E316-16 E316-15	≤0.08	≤0.90	0.5~2.5	17.0~20.0	11.0~14.0	2.0~3.0	≤0.75	—	—	—	耐腐蚀层堆焊
7	低碳 23-13 型	A301 A302 A307	E309-16 E309-16 E309-15	≤0.15	≤0.90	0.5~2.5	22.0~25.0	12.0~14.0	≤0.75	≤0.75	—	—	—	耐腐蚀层的过渡层堆焊
8	低碳 23-13Mo 型	A312	E309Mo-16	≤0.12	≤0.90	0.5~2.5	22.0~25.0	12.0~14.0	2.0~3.0	≤0.75	—	—	—	耐腐蚀层堆焊
9	低碳 26-21 型	A402 A407	E310-16 E310-15	0.08~0.20	≤0.75	1.0~2.5	25.0~28.0	20.0~22.5	≤0.75	≤0.75	—	—	—	耐腐蚀层堆焊
10	低碳 26-21Mo2 型	A412	E310Mo-16	≤0.12	≤0.75	1.0~2.5	25.0~28.0	20.0~22.0	2.0~3.0	≤0.75	—	—	—	耐腐蚀层堆焊
11	29-9Mo1 型			≤0.12	—	—	28	9.0	1.0	—	—	250	450	耐蚀堆焊、热冲压、挤压模具堆焊
12	18-8Mn6 型	GRINOX25		0.10	0.5	6.5	18	8.0	—	—	—	200	—	过渡层堆焊、水轮机叶片焊接
13	20-10Mn6 型	A146		≤0.12	—	4.0~7.0	19.0~22.0	8.0~11.0	—	—	—	—	—	过渡层堆焊、水轮机叶片焊接



续表 4.17-19

序号	焊条名称	牌　号	国标型号（GB）	堆焊金属化学成分（质量分数）/%								硬度 HB		用　途
				C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	焊后	冷作硬化	
14	铬镍奥氏体阀门堆焊焊条	D547	EDCrNi－A－15	≤0.18	4.80～6.40	0.60～2.00	15.00～18.00	7.00～9.00	—	—	—	270～320	—	570℃以下蒸汽阀门堆焊
15	铬镍奥氏体阀门堆焊焊条	D547 Mo	EDCrNi－B－15	≤0.18	3.80～6.50	0.60～5.00	14.00～21.00	6.50～12.00	3.50～7.00	其他≤2.50	0.50～1.20	HRC≥37	—	600℃以下蒸汽阀门堆焊
16	铬镍奥氏体阀门堆焊焊条	D557	EDCrNi－C－15	≤0.20	5.00～7.00	2.00～3.00	18.00～20.00	7.00～10.0	—	—	—	HRC≥37	—	600℃以下蒸汽阀门堆焊
17	铬镍奥氏体阀门高效堆焊焊条	D582		≤0.10	≤1.00	≤2.50	≥18.00	≥8.00	—	—	—	≈170	—	阀门密封角堆焊

注：堆焊金属化学成分余量为 Fe。

表 4.17-20　铬镍奥氏体不锈钢堆焊焊丝、带极的成分、硬度及用途

序号	焊丝、带极名称	牌　号	丝极、带极化学成分（质量分数）/%						硬度 HV		用　途
			C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	焊后	冷作后	
1	超低碳 20－10 型焊丝、带极	00Cr20Ni10	≤0.025	20	10	—	—	—	—	—	耐腐蚀层堆焊
		D00Cr20Ni10	≤0.025	19.5～20.5	9.5～10.5	—	1.0～2.5	≤0.6	—	—	堆焊核电压力容器内衬耐蚀层（第二层）
2	超低碳 20－10Nb 型焊丝、带极	D00Cr20Ni10Nb	≤0.02	18.5～20.5	9～11	Nb8×C～1.0	1.0～2.5	≤0.6	—	—	堆焊核电压力容器内衬耐蚀层（第二层）
3	超低碳 19－10 型自保护药芯焊丝	YA002－2（相当 AWSE308LT－3）	≤0.04	18.0～21.0	9.0～11.0	—	1.0～2.5	—	—	—	耐腐蚀层堆焊
4	超低碳 19－12Mo 型焊丝、带极	00Cr19Ni12Mo	≤0.025	19	12	2.5	—	—	—	—	耐腐蚀层堆焊
		D00Cr18Ni12Mo2	≤0.02	17～19.5	11～14	2～3	1.0～2.5	≤0.5	—	—	化肥设备用压力容器耐腐蚀层（第二层）堆焊
5	超低碳 21－10 型焊丝、带极	00Cr21Ni10	≤0.02	21	10	—	—	—	—	—	耐腐蚀层堆焊
6	超低碳 25－11 型焊丝、带极	00Cr25Ni11	≤0.02	25	11	—	—	—	—	—	耐腐蚀层的过渡层堆焊
7	超低碳 25－12 型焊丝、带极	00Cr25Ni12	≤0.02	25	12	—	—	—	—	—	耐腐蚀层的过渡层堆焊
8	超低碳 24－13 型焊丝、带极	D00Cr24Ni13	≤0.02	23～25	12～14	—	1.0～2.5	≤0.6	—	—	核电压力容器、加氢反应器，尿素塔等容器的内衬过渡层（第一层）堆焊
9	超低碳 24－13Nb 型焊丝、带极	D00Cr24Ni13Nb	≤0.02	23～25	12～14	Nb8×C～1.0	1.0～2.5	≤0.6	—	—	堆焊核电压力容器的过渡层及热壁加氢反应器内壁单层堆焊
10	超低碳 26－12 型焊丝、带极	00Cr26Ni12	≤0.02	26	12	—	—	—	—	—	耐腐蚀层的过渡层堆焊



续表 4.17-20

序号	焊丝、带极名称	牌号	丝极、带极化学成份（质量分数）/%						硬度 HV		用途
			C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	焊后	冷作后	
11	超低碳 25-13 型焊丝、带极	00Cr25Ni13	≤0.02	25	13	—	—	—	—	—	耐腐蚀层的过渡层堆焊
12	超低碳 25-13Mo 型焊丝、带极	00Cr25Ni13Mo	≤0.02	25	13	2	—	—	—	—	耐腐蚀层的过渡层堆焊
13	超低碳 25-22Mo 型焊丝、带极	00Cr25Ni22Mo	≤0.02	25	22	2	—	—	—	—	耐腐蚀堆焊，尿素装置堆焊
14	超低碳 25-22Mn4Mo2N 型焊丝、带极	D00Cr25Ni22Mn4Mo2N	≤0.02	24~26	21~23	2~2.5	4~6	≤0.2 N0.1~0.15	—	—	尿素塔内衬里耐腐蚀层堆焊
15	29-9 型焊丝	0Cr29Ni9	≤0.15	29	9	—	—	—	250	450	耐腐蚀堆焊，热冲压模具堆焊
16	19-9Mn6 型焊丝	Cr19Ni9Mn6	≤0.1	19	9	—	6	—	200	—	缓冲层堆焊，水轮机叶片堆焊，异种钢焊接

注：丝极、带极化学成分余量为 Fe。

表 4.17-21 等离子堆焊用铬镍奥氏体型铁基合金粉末的成分、硬度及用途

序号	名称	牌号	合金粉末化学成分（质量分数）/%										堆焊金属硬度 HRC	用途
			C	Si	Mn	Cr	Ni	B	Mo	W	V	Nb		
1	铬镍奥氏体型铁基合金粉末	F322	≤0.15	4.0~5.0	—	21.0~25.0	12.0~15.0	1.5~2.0	2.0~3.0	2.0~3.0	—	—	36~45	中温中压阀门的阀座或其他耐磨耐蚀件的堆焊
2		F327A	0.1~0.18	3.5~4.0	1.0~2.0	18~21	10~13	1.4~2.0	4.0~4.5	1.0~2.0	0.5~1.0	0.2~0.7	36~42	≤600℃高压阀门密封面堆焊
3		F327B	0.1~0.2	4.0~4.5	1.0~2.0	18~21	10~13	1.7~2.5	4.0~4.5	1.0~2.0	0.5~1.0	0.2~0.7	40~45	≤600℃高压阀门密封面堆焊
4		F328	≤0.1	2~3	—	19~21	12~14	1~2	—	—	—	—	25~35	中温中压阀门的阀座或其他耐磨耐蚀件的堆焊
5		F329	≤0.1	1.5~2.5	—	17~19	8~10	1.5~2.5	0.5~1.5	—	—	—	30~40	中温中压阀门的阀座或其他耐磨耐蚀件的堆焊

注：合金粉末化学成分余量为 Fe。

常用的耐蚀铬镍奥氏体不锈钢堆焊材料主要采用手工电弧堆焊和带极堆焊，后者在内壁大面积堆焊中是最常用的工艺方法。手工电弧堆焊时一般先用高铬镍的 25-13 型或 26-12 型不锈钢焊材堆焊一层过渡层，该过渡层要求有一定量的铁素体和熔合区有较高的韧性；某些核容器和化工容器等重要结构所用的过渡层材料需经过仔细计算和试验确定。耐蚀层堆焊材料成分也需满足技术要求中规定的化学成分和铁素体含量的要求。无论过渡层和耐蚀层堆焊，均需采用尽可能小的线能量。一般情况下焊前不预热，焊后不热处理，但应严格控制层间温度不能过高。带极堆焊又分埋弧堆焊、电渣堆焊和高速带极堆焊（电渣、电弧联合过程）三种。前二种工艺较成熟，生产中应用较多。带极堆焊一般也采用先焊过渡层的双层堆焊工艺，如焊接技术和管理水平较高的企业，也可采用单层堆焊。对于在含氢介质中工作的工件，近年来开发的高速带极堆焊技术也得到了应用。

耐蚀耐磨的铬镍奥氏体钢大部分用于阀门堆焊，其主要采用手工电弧堆焊和粉末等离子弧堆焊。手工电弧堆焊除工件预热温度要求稍高，一般为 300~450℃左右外，其余工艺要点与其他铬镍奥氏体钢相同。粉末等离子弧堆焊的工艺拟定原则是在保证稀释率较低的前提下，尽量提高熔敷速度，堆焊工艺参数可以在比较宽的范围内变化。

(4) 合金铸铁堆焊金属

一般含碳量大于 2% 的铁基堆焊合金均属于铸铁类型。为了进一步提高铸铁堆焊金属的耐磨性，通常加入一种或几



种合金元素（如 Cr、Ni、W、Mo、V、Ti、Nb、B 等），从而获得具有优良的抗磨料磨损性能的合金铸铁堆焊层。不同的合金铸铁堆焊层，在耐热性、耐磨性、耐蚀性、抗氧化性和抗裂性方面有所差别。调节合金元素的种类和含量，既能控制堆焊金属的基体组织，又能控制碳化物、硼化物等抗磨硬质相的种类和数量，以适应不同工作条件下零件的不同要求。合金铸铁堆焊金属依不同的成分和堆焊层的金相组织分为马氏体合金铸铁、奥氏体合金铸铁和高铬合金铸铁等三大类。

马氏体合金铸铁堆焊金属以 C－Cr－Mo、C－Cr－W 和 C－W 为主要的合金系统。含碳量一般控制在 2%～5%，含铬量多在 5%左右，常加入的合金元素还有 Nb、B 等，其合金总含量要控制在堆焊层冷却至室温时至少部分形成马氏体，但又不出现珠光体。Cr、Ni、W 等元素对堆焊层的组织有很大影响，必须严格控制。这类合金铸铁堆焊金属属于亚共晶合金铸铁，其组织为马氏体＋残余奥氏体＋共晶组织。马氏体和残余奥氏体呈块状分布，共晶组织由含合金元素的 M_3C 型碳化物的连续相和马氏体岛组成。M_3C 的硬度为 HV1 000左右，而马氏体硬度约为 HV400～700。堆焊层的宏观硬度为 HRC50～60。这类合金铸铁具有很高的抗磨料磨损性能，能耐轻度冲击，耐热、耐蚀和抗氧化性能也较好。故主要用于有轻度冲击的磨料磨损条件下工作的零件堆焊，也适合于某些粘着磨损零件的堆焊，如成型轧辊、切割刀具、刮板机等。马氏体合金铸铁堆焊材料的成份，硬度及用途见表 4.17-22。

表 4.17-22　马氏体合金铸铁堆焊焊条的成分、硬度与用途

序号	牌号	国标型号（GB）	堆焊金属化学成分（质量分数）/%						堆焊金属硬度 HRC	用　途
			C	Cr	Mo	W	B	其他		
1	D608	EDZ－A1－08	2.50～4.50	3.00～5.00	3.00～5.00	—	—	—	≥55	矿山设备，农业机械等承受沙粒磨损与轻微冲击的零件堆焊
2	D678	EDZ－B1－08	1.50～2.20	—	—	8.00～10.00	0.015	≤1.00	≥50	矿山和破碎机零件等受磨粒磨损的部件堆焊
3	D698	EDZ－B2－08	≤3.00	4.00～6.00	—	8.50～14.00	—	—	≥60	矿山机械、泥浆泵的堆焊

注：堆焊金属化学成分余量为 Fe。

奥氏体合金铸铁堆焊金属含碳 2.5%～4.5%，含铬 15%左右，还含有锰、镍等元素，组织为奥氏体＋共晶，共晶组织由 M_7C_3 型、M_3C 型碳化物和奥氏体组成。奥氏体硬度虽比马氏体低，但由于奥氏体合金铸铁中含有较多高硬度的 M_7C_3 型共晶碳化物，所以耐低应力磨料磨损性能也很好，但耐高应力磨料磨损性比马氏体合金铸铁堆焊层低。堆焊层宏观硬度 HRC45～55，耐腐蚀性和抗氧化性较好，有一定韧性，能承受中等冲击，对开裂和剥离的敏感性比马氏体合金铸铁和高铬合金铸铁堆焊层都小。能研磨加工，适用于中度冲击及低应力磨料磨损和腐蚀条件下工作零件的堆焊。具体成分、硬度及用途见表 4.17-23。

表 4.17-23　奥氏体合金铸铁堆焊材料的成分、硬度及用途

序号	名　称	牌　号	堆焊金属化学成分（质量分数）/%							堆焊金属硬度 HRC	用　途
			C	Cr	Si	Mn	Ni	Mo	V		
1	奥氏体合金铸铁堆焊药芯焊丝	GRIDURF－43	3.0	16	—	—	—	1.5	0.3	45～55	粉碎机辊、挖掘机齿、挖泥机耐磨件、螺旋输送器等推焊
2	奥氏体合金铸铁堆焊焊条或药芯焊丝	—	3.2	16.0	—	—	6.0	8.0	—	—	粉碎机辊、挖掘机齿、挖泥机耐磨件，螺旋输送器等推焊
3	奥氏体合金铸铁堆焊焊条或药芯焊丝	—	3.0	12.0	1.5	2.5	—	1.6	—	—	
4	奥氏体合金铸铁堆焊焊条或药芯焊丝	—	4.0	16.0	—	—	2.0	8.0	—	—	

注：堆焊金属化学成分余量为 Fe。

高铬合金铸铁堆焊金属含碳 1.5%～6.0%、含铬 15%～25%。为进一步提高耐磨性、耐热性、耐蚀性和抗氧化性，加入钨、钼、镍、硅和硼等合金元素。这类合金又可分成三种类型，即奥氏体型、马氏体型和多元合金强化型。它们的共同特点是含有大量针状 Cr_7C_3，这种极硬的碳化物（Cr_7C_3 硬度 HV1 750）分布在基体中，大大提高了堆焊层耐低应力磨料磨损的能力。但耐高应力磨料磨损的性能还取决于基体对 Cr_7C_3 的支撑作用。所以耐高应力磨料磨损性能，奥氏体型的最差，多元合金强化型的最好。由于含铬量高，这类合金的抗氧化性能好，抗热磨损性能也较好。



奥氏体型高铬合金铸铁含碳量较高，奥氏体稳定，不能通过热处理强化，性能较脆，容易因焊缝热收缩或在交变温度的工作条件下，因热应力作用引起开裂。加入锰、镍等合金元素可降低开裂倾向。这类合金堆焊层有很高的耐低应力磨料磨损的能力，能经受中度冲击，抗氧化性好，可磨削加工，但抗高应力磨料磨损性能较差。

马氏体型高铬合金铸铁比奥氏体型的有更高的耐高应力磨料磨损的性能，有很好的热硬度和抗氧化能力。但只能耐轻度冲击，对开裂的敏感性大（需要预热和后热）。而其中应用最多的是含碳2.5%、含铬25%的可退火型的合金。它堆焊后基体组织是奥氏体，硬度HRC45～55。焊态时的韧性比奥氏体型高铬合金铸铁的韧性还高。经800～850℃退火后可加工。再经950～1 090℃空淬后，基体组织变成马氏体，硬度可高达HRC60。这种合金有很高的耐低应力磨料磨损能力和中等的耐高应力磨料磨损能力。

用钨、钼或钒等强化的高铬合金铸铁，硬度很高，有极好的耐磨料磨损性能。一般高铬合金铸铁加热到430℃时，硬度迅速下降。而用钨、钼和钴等强化的合金，在430～650℃之间仍能有效地保持热硬度，因而具有良好的耐热磨损性能。但只能耐轻度冲击。（为减少堆焊层裂纹，必须焊前预热、焊后缓冷。）

在高铬合金铸铁中加入硼可显著提高耐磨料磨损性。但抗裂性和机加工性能下降。加入镍、降低堆焊层含碳量，都可以降低裂纹敏感性。

高铬合金铸铁堆焊金属，由于有合金碳化物和硼化物作为抗磨损的硬质相，所以硬度高，耐磨性很好，而且还具有一定的耐热、耐蚀和抗氧化等性能，在生产中应用很广。但除了高铬奥氏体合金铸铁能耐中度冲击外，其他的只能耐轻度冲击。高铬合金铸铁堆焊材料的成分、硬度和用途见表4.17-24、表4.17-25。

表 4.17-24 高铬合金铸铁堆焊焊条的成分、硬度及用途

序号	牌号	国标型号（GB）	堆焊金属化学成分（质量分数）/%								堆焊金属硬度 HRC	用途
			C	Cr	Mn	Si	Mo	V	W	其他		
1	D618		≤3.00	15.00～20.00	—	—	1.00～2.00	≤1.00	10.00～20.00	—	≥58	承受轻微冲击载荷的磨料磨损的零件，如磨煤机锤头等的堆焊
2	D628		3.00～5.00	20.00～35.00	—	—	4.00～6.00	≤1.00	—	—	≥60	轻度冲击载荷的磨料磨损零件，如磨煤机、扇式碎煤机冲击板等零件的堆焊
3	D632A		2.50～5.00	25.00～40.00	—	—	—	—	—	—	≥56	抗磨粒磨损或常、高温耐磨耐蚀的工作表面。如喷粉机、掘沟机、辗路机堆焊
4	D638		3.00～6.50	25.00～40.00	—	—	—	—	—	—	≥60	抗磨粒磨损表面，如料斗、铲刀、泥浆泵、粉碎机、锤头的堆焊
5	D638Nb		3.0～6.5	20.00～35.00	Nb 4.00～8.50	—	—	—	—	—	≥60	受磨粒磨损严重部件及高温磨损部件的堆焊
6	D642 D646	EDZCr－B－03 EDZCr－B－16	1.50～3.50	22.00～32.00	≤1.00	—	—	—	—	≤7.00	≥45	水轮机叶片、高压泵等耐磨零件、高炉料钟等的堆焊
7	D656	EDZ－A2－16	3.00～4.00	26.00～34.00	≤1.50	≤2.50	2.00～3.00	—	—	≤3.00	≥60	受中等冲击及磨粒磨损的耐磨耐蚀件，如混凝土搅拌机，高速混砂机，螺旋送料机及≤500℃的高炉料钟、矿石破碎机、煤孔挖掘器的堆焊
8	D658		3.00～6.50	20.00～35.00	Nb 4.00～8.50	—	4.00～9.50	0.50～2.50	2.50～7.50	—	≥60	磨损严重部件及高温磨损部件的堆焊



续表 4.17-24

序号	牌号	国标型号（GB）	堆焊金属化学成分（质量分数）/%								堆焊金属硬度 HRC	用　途
			C	Cr	Mn	Si	Mo	V	W	其他		
9	D667	EDZCr－C－15	2.50～5.00	25.00～32.00	≤8.00	1.00～4.80	Ni 3.00～5.00	—	—	≤2.00	≥48	强烈磨损、耐蚀、耐气蚀的零件。如石油工业离心裂化泵轴套、矿山破碎机、汽门盖等零件的堆焊
10	D687 D680	EDZCr－D－15	3.00～4.00	22.00～32.00	1.50～3.50	≤3.00	—	—	B 0.50～2.50	≤6.00	≥58	强磨料磨损条件下的零件、如牙轮钻小轴、煤孔挖掘器，碎矿机辊、泵框筒、提升戽斗、混合器叶片等零件堆焊
11	D700		≤4.0	≤35	≤1.5	≤2.0	—	—	—	—	≈60	耐磨、耐蚀抗气蚀件堆焊，如高炉料钟、制砖机螺旋绞刀、水轮机叶片、破碎机辊、泥浆泵等
12	D800		≤4.0	≤35	≤1.5	≤2.0	—	—	—	—	≈64	耐磨、耐蚀抗气蚀件堆焊，如高炉料钟、制砖机螺旋绞刀、水轮机叶片、破碎机辊、泥浆泵等

注：堆焊金属化学成分余量为 Fe。

表 4.17-25　高铬合金铸铁实心及药芯焊丝的成分、硬度及用途

序号	名称和牌号	焊丝或堆焊金属化学成分（质量分数）/%								堆焊金属硬度 HRC	用　途
		C	Cr	Mn	Si	B	Ni	Co	Fe		
1	HS101 焊丝	2.5～3.3	25.0～31.0	0.50～1.5	2.8～4.2	—	3.0～5.0	—	余量	48～54	耐磨损、抗氧化、耐气蚀的零件，如铲斗齿、泵套、汽门、排气叶片等堆焊
2	HS103 焊丝	3.0～4.0	25.0～32.0	≤3.0	≤3.0	0.5～1.0	—	4.0～6.0	余量	58～64	强烈磨损，如牙轮钻轴、煤孔挖掘器、提升戽斗、破碎机辊、混合叶片、泵框筒等零件的堆焊
3	YD616－2 自保护药芯焊丝	3.0～3.50	13.50～15.50	0.90～1.20	0.70～1.0	—	Mo 0.30～0.60	—	余量	46～53	受中等磨料磨损，中等至严重冲击载荷的部件，如耙路机的齿、破碎机锤头，挖土机齿的堆焊
4	YD646Mo－2 自保护药芯焊丝	2.90～3.40	23.0～26.0	0.60～1.0	0.50～1.90	—	Mo 2.50～3.10	—	余量	54～60	受轻微到中等冲击，严重磨料磨损部件如筑路机和采石设备零件，搅拌机叶片等堆焊
5	YD656－4 埋弧堆焊药芯焊丝	6.0～7.0	34.0～39.0	0.10～0.70	0.10～0.70	—	—	—	余量	≈57	受严重磨料磨损及轻微冲击载荷的部件，如磨煤机辊子的堆焊
6	YD667Mn－4 埋弧堆焊药芯焊丝	4.80～5.50	25.0～30.0	2.0～3.0	1.0～1.90	其他 ≤2.0	—	—	余量	≥54	磨煤机辊子，催化剂输送管道，受砂土磨损的推进器提升机的堆焊
7	YD687－1 埋弧堆焊药芯焊丝	3.50～4.50	20.0～30.0	1.0～3.0	1.0～2.0	其他 ≤3.0	—	—	余量	≥55	受严重磨料磨损和轻微冲击载荷的部件，如中速磨煤机磨辊等的堆焊



合金铸铁堆焊材料总的来讲，抗裂性均较差，焊前均需预热，焊后需缓冷，预热温度随堆焊材料而异，一般均大于400℃。其中奥氏体合金铸铁堆焊时也可用Cr19Ni8Mn7焊条堆焊过渡层以防止裂纹。堆焊方法可以用氧-乙炔焰堆焊，手工电弧堆焊或用药芯焊丝进行自保护或气体保护电弧堆焊。

2.6　其他堆焊合金

(1) 镍与镍基合金堆焊金属

镍与镍基合金中一类是属于含碳量较低的（一般≤0.15%）纯镍、镍铜（蒙乃尔）和镍基合金，由于它们良好的抗裂性，可用作铸铁或其他难焊合金的过渡层堆焊材料，又由于它们有良好的耐热，耐蚀性，也可用作耐热、耐蚀层堆焊材料。另一类是耐热，耐蚀且耐磨的镍铬硼硅和镍铬钼钨合金。而镍铬钨硅合金（NDG-2）和镍钼铁合金（60Ni-20Mo-20Fe）近年也得到发展。后者耐腐蚀性好，主要用于耐盐酸、耐碱等化工设备中。

镍铬硼硅系列合金含碳量都低于1%，根据含铬量的变化（0~18%），含硼量在1%~4.5%之间变化。该系列合金具有较低的熔点（1 040℃），较好的润湿性与流动性，由于有较高的Si、B含量，故属于自熔性合金，主要用于粉末等离子堆焊和氧－乙炔焰喷熔。堆焊层组织是奥氏体＋硼化物＋碳化物。有优良的耐低应力磨料磨损性能和耐金属间磨损性能，好的耐腐蚀、耐热和高温（最高可达950℃）抗氧化性能。常用于对堆焊金属耐热、耐腐蚀和耐低应力磨料磨损同时有要求的场合。但耐高应力磨料磨损性和耐冲击性不好。另外，镍基合金堆焊材料比钴基价廉，所以在许多应用场合可代替钴基合金，特别是无钴、无硼的堆焊材料，如NDG－2，Ni337等，由于不会在辐照中产生放射性污染，因此在核能工程的阀门及各种密封件堆焊中，成为代替钴基合金的理想材料。镍铬硼硅系合金耐高应力磨料磨损和耐冲击性不好，且高镍合金易受到硫和硫化氢的腐蚀，因而不适于在含有硫的还原性气氛中工作。镍铬钼钨合金硬度低，机加工性好，能用碳化钨刀具加工，主要用来抗腐蚀。但它强度高，韧性好、耐冲击，有很好的热抗力，也可用作高温耐磨堆焊材料。镍与镍基合金堆焊材料的成分，硬度及用途见表4.17-26、表4.17-27。

表4.17-26　堆焊用或兼做堆焊用镍基合金电焊条的成分、硬度及用途

序号	名称	牌号	国标型号(GB)	堆焊金属化学成分（质量分数）/%												堆焊金属硬度HB	用　途
				C	Si	Mn	Cr	Nb	W	Mo	Fe	Cu	Ti	Al	Ni		
1	纯镍焊条	Ni112	ENi－0	≈0.04	—	≈1.5	—	≈1.0	—	—	≈3.0	—	≈0.5	—	≥92	—	堆焊过渡层
2	镍铜合金（蒙乃尔合金）焊条	Ni202 Ni207	ENiCu－7	≤0.15	≤1.5	≤4.0	—	≤2.5	—	—	≤2.5	余量	≤1.0	≤0.75	62~69	—	堆焊过渡层
3	Ni70Cr15型耐热耐蚀合金焊条	Ni307	ENiCrMo－0	≈0.05	—	—	≈15	3~5	—	2~6	≤7	—	—	—	≈70	—	耐热耐蚀堆焊
4	Ni70Cr15型耐热耐蚀合金焊条	Ni307A	ENiCrFe－3	≤0.10	≤1.0	5.0~9.5	13.0~17.0	Nb＋Ta 1.0~2.5	—	—	≤10.0	≤0.5	≤1.0	其他≤0.50	≥59.0	—	耐热耐蚀堆焊
5	镍铬耐热合金焊条	Ni307B	ENiCrFe－3	≤0.10	≤1.0	5.0~9.5	13~17	1.0~2.5	—	—	≤10	≤0.5	≤1.0	—	≥59.0	—	耐蚀堆焊
6	Ni70Cr15型耐热合金焊条	Ni327	ENICrMo－0	≤0.05	≤0.75	1.0~5.0	13.0~17.0	Nb＋Ta 1.5~5.5	—	3.0~7.5	4.0~8.0	—	—	—	余量	—	耐热、耐蚀堆焊
7	镍铬耐热耐蚀合金焊条	Ni337		0.035	0.28	2.35	15.76	3.72	—	4.80	6.28	Co0.03	—	—	余量	248.4	核反应堆压力容器密封面堆焊
8	Ni70Cr15型镍基合金焊条	Ni357	ENiCrFe－2	≤0.10	≤0.75	1.0~3.5	13.0~17.0	Nb＋Ta 0.5~3.0	—	0.5~2.5	≤12.0	≤0.5	—	—	≥62	—	过渡层堆焊及耐热、耐蚀堆焊
9	镍铬铝型镍基合金焊条			—	—	—	6~8	—	—	—	—	—	—	6~8	80~86	HRC ≥32（焊态）≥54（冷作硬化后）	受泥沙、汽蚀磨损的水轮机叶片等工件的堆焊



续表 4.17-26

序号	名称	牌号	国标型号 (GB)	堆焊金属化学成分（质量分数）/%												堆焊金属硬度 HB	用　途
				C	Si	Mn	Cr	Nb	W	Mo	Fe	Cu	Ti	Al	Ni		
10	镍铬钼钨合金堆焊焊条	GRIDUR34		≤0.05	—	—	16~17	—	4.0~5.0	16~17	4.0~5.0	—	—	—	余量	220（冷作硬化后400）	热剪机刃、热冲头、锻模堆焊
11	镍基合金堆焊电焊条	HAYNES NO.711		2.7	1.0	1.0	27	Co 12	3	8	23	—	—	—	余量	HRC 42	挤压机螺杆、凿岩钻头、泥浆泵、低冲击的冲模堆焊

表 4.17-27　等离子堆焊用镍基合金粉末的成分、硬度及用途

序号	名　称	牌号	粉末或焊丝化学成分（质量分数）/%										硬度 HRC	用　途
			C	Cr	Si	Mn	B	Fe	Mo	W	Co	Ni		
1	镍铬硼硅堆焊合金粉末	F121	0.30~0.70	8.0~12.0	2.5~4.5	—	1.8~2.6	≤4	—	—	—	余量	40~50	高温耐蚀阀门、内燃机排气阀、螺杆、凸杆堆焊
2	镍铬硼硅堆焊合金粉末	F122	0.60~1.0	14.0~18.0	3.5~5.5	—	3.0~4.5	≤5	—	—	—	余量	≥55	模具、轴类、高温耐蚀阀门、内燃机排气阀堆焊
3	镍铬钨硅堆焊合金粉末及铸造焊丝	NDG-2	0.30~1.5	15~35	1.0~6.0	—	—	—	—	2.0~8.0	—	余量	≥38	高温高压通用阀门密封面、汽轮机叶片、螺旋推进器、热剪刃、热模具堆焊
4	镍基堆焊合金粉末及铸造焊丝	HAYNES NO.711	2.7	27	1.0	1.0	—	23	8.0	3.0	12	余量	42	挤压机螺杆、凿岩钻头、泥浆泵、低冲击的冲模的堆焊
5	镍基堆焊合金粉末及铸造焊丝	HAYNES NO.N-6	1.1	29	1.5	1.0	0.60	3.0	5.5	2.0	3	余量	28	液体阀座、螺旋推进器、各种切割用刀堆焊
6	镍铬硼硅铸造焊丝	HS121	0.5~1.0	12.0~18.0	3.5~5.5	≤1.0	2.5~4.5	3.5~5.5	≤10.0	—	—	余量	58~62	耐蚀泵阀、轴套、高温喷嘴、链轮、内燃机摇臂、螺杆送料器、柱塞堆焊

镍基合金常用的堆焊方法为手工电弧堆焊、等离子弧堆焊、氧-乙炔焰堆焊或喷熔，还可用铸造焊丝的 TIG 焊。TIG 焊因没有增碳及和渣的相互作用，所以是镍基合金较好的堆焊方法。对于 NiCrBSi 系自熔性合金粉末，从 20 世纪 80 年代开始，真空熔结技术也逐步得到应用。近年来激光粉末堆焊和聚焦光束粉末堆焊在精密堆焊场合也获得了一定的应用。在低碳钢、低合金钢和不锈钢上堆焊镍基合金，一般不要求预热，且尽量采用较小的线能量，以防止熔池在高温停留时间过长。焊后一般不热处理，零件材质为含碳量高的钢时，应先堆焊过渡层。手工电弧堆焊时尽量避免作横向摆动。多层堆焊时，层间温度不宜超过 100~150℃。采用铸造的镍基合金焊丝 TIG 堆焊时，根据工件大小选定焊丝直径及所需电流，然后选定所需的钨极直径及相应的焊矩。镍基合金粉末等离子堆焊要求焊前严格清理工作表面的氧化物和油污，堆焊工艺参数要控制适当，避免堆焊层稀释率过高。镍铬钼钨合金因为含碳量较低，用氧-乙炔焰堆焊时应注意由于碳化焰的渗碳作用，会使耐磨性下降。

（2）钴基合金堆焊金属

钴基堆焊金属主要指钴铬钨堆焊合金，即通常所谓的司太立合金。该类堆焊金属含铬为 25%~33%，含钨为 3%~21%。铬主要提高抗氧化性，钨主要提高高温（540~650℃）蠕变强度。在 650℃左右仍能保持较高的硬度，是该合金区别于铁基、镍基堆焊合金的重要特点，也是该合金在堆焊中得到较多应用的重要原因。此外，该合金具有一定的抗腐蚀性，优良的抗黏着磨损性能。随着含碳量的增高，强度提高。生成的 Cr_7C_3 使它具有优良的抗磨料磨损性能。钴基合金堆焊材料价格昂贵，所以尽量以镍基或铁基堆焊材料代用。由于能加工得很光滑，加上高的抗擦伤能力和低的摩



擦系数，使钴基合金特别适合于金属间磨损，加上它具有较高的抗氧化性、抗腐蚀性和耐热性能，一般高温腐蚀和高温磨损工况条件下宜选用钴基合金。

CoCr－A类合金碳和钨含量较低，韧性较好，能承受冷热条件下的冲击，不易产生裂纹，可用硬质合金刀具加工，常用于内燃机排气阀的表面堆焊。CoCr－B和CoCr－C含碳和钨都较高，故硬度高，耐磨性好，但抗冲击性差，堆焊时易开裂，只能用磨削加工。CoCr－D合金含碳量很低，在800℃仍能保持良好的抗热疲劳性和耐蚀性，主要用于高温下受冲击和冷热交错部位的堆焊。钴基合金堆焊材料的成分、硬度及用途见表4.17-28、表4.17-29、表4.17-30和表4.17-31。

为节约昂贵的钴基合金堆焊材料的消耗，该合金堆焊应尽量选择低稀释率的氧-乙炔焰堆焊或粉末等离子弧堆焊工艺。真空熔结工艺的应用范围也在不断扩大。当工件较大时也可选用手工电弧堆焊。

氧－乙炔焰堆焊层稀释率低，堆焊层质量好，多用于堆焊含碳量较低的CoCr－A合金。堆焊时宜采用3～4倍乙炔过剩焰。对于较厚的工件，须用中性焰预热到430℃。为防止开裂焊后应缓冷。粉末等离子弧堆焊要求在焊前严格清除工件表面的氧化物和油污；堆焊工艺要控制适当，以避免堆焊层稀释率过高；对大工件应采取焊前预热、焊后缓冷措施。手工电弧堆焊稀释率较大，对性能将产生不利影响。因而适用于笨重的服役条件下要求高抗磨性的场合。一般适用于较大工件。宜采用小电流短弧堆焊。焊前应根据工件尺寸预热300～600℃，焊后应在600～700℃回火1 h后再缓冷或将工件立即放入干燥和预热的砂箱内或草灰中缓冷，以避免裂纹。

钴基合金堆焊层一般在焊态使用。不能通过热处理强化。为减少开裂倾向，偶然用去应力退火处理。

表4.17-28 气焊及TIG堆焊用钴基堆焊焊丝的成分、硬度及用途

序号	名称	牌号	相当于AWS/ASTM	焊丝化学成分（质量分数）/%									堆焊层硬度HRC	用途
				C	Mn	Si	Cr	W	Fe	Ni	Mo	Co		
1	钴基堆焊焊丝	HS111	RCoCr－A	0.9～1.4	≤1.0	0.4～2.0	26～32	3.5～60	≤2.0	—	—	余量	40～45	高温高压阀门、热剪切刀刃、热锻模等堆焊
2	钴基堆焊焊丝	HS112	RCoCr－B	1.2～1.7	≤1.0	0.4～2.0	26～32	7.0～9.5	≤2.0	—	—	余量	45～50	高温高压阀门、内燃机阀、化纤剪刀刃口、高压泵轴套和内衬套筒、热轧辊孔型等堆焊
3	钴基堆焊焊丝	HS113	—	2.5～3.3	≤1.0	0.4～2.0	27～33	15～19	≤2.0	—	—	余量	55～60	牙轮钻头轴承、锅炉的旋转叶片、螺旋送料器、粉碎机刃口的堆焊
4	钴基堆焊焊丝	HS113G	—	3.20～3.55	≤1.0	0.5～1.1	24～28	12～16	≤2.5	—	—	余量	≥54	泵的套筒和旋转密封环、磨损面板、轴承套筒、螺旋送料机、高温热轧辊，油田钻头堆焊
5	钴基堆焊焊丝	HS113Ni	—	1.5～2.0	—	0.9～1.3	24～27	11.5～13	0.85～1.35	21～24	—	余量	37～40	耐气蚀、耐腐蚀要求较高的内燃机气门、排气阀的堆焊
6	钴基堆焊焊丝	HS114	RCoCr－C	2.4～3.0	≤1.0	≤2.0	27.0～33.0	11.0～14.0	≤2.0	—	—	余量	≥52	牙轮钻头轴承、锅炉的旋转叶片、粉碎机刀口、螺旋送料机等的堆焊
7	钴基堆焊焊丝	HS115	—	0.15～0.35	—	—	25.5～29.0	—	—	1.75～3.25	5.0～6.0	余量	≥27	液体阀门阀座、水轮机叶片、铸模和挤压模及各种热模具堆焊
8	钴基堆焊焊丝	HS116	—	0.70～1.20	≤0.5	≤1.0	30.0～34.0	12.5～15.5	≤1.0	—	—	余量	46～50	铜基合金和铝合金的热压模，热挤压模及塑料、造纸，化学工业中耐蚀、耐磨部件的堆焊
9	钴基堆焊焊丝	HS117	—	2.30～2.65	≤0.5	≤1.0	31.0～34.0	16.0～18.0	—	≤3.0	—	余量	≥53	泵的套筒和旋转密封环、磨损面板，轴承套筒及无心磨床的工件架等的堆焊



表 4.17-29　钴基合金焊丝堆焊金属的高温硬度

序　号	牌　号	堆焊方法	高　温　硬　度　HV							
			427℃	500℃	538℃	600℃	649℃	700℃	760℃	800℃
1	HS111	1	—	365	—	310	—	274	—	250
2	HS112	1	—	410	—	390	—	360	—	295
3	HS113	1	—	623	—	550	—	485	—	320
4	HS113G	1	475	—	440	—	380	—	260	—
		2	510	—	465	—	390	—	230	—
5	HS113Ni	2	275	—	265	—	250	—	195	—
6	HS114	1	—	623	—	530	—	485	—	320
7	HS115	2	130	—	135	—	140	—	110	—
8	HS116	2	475	—	430	—	370	—	290	—
9	HS117	2	528	—	435	—	355	—	248	—

注：堆焊方法 1 为氧乙炔焰堆焊，2 为钨极氩弧堆焊。

表 4.17-30　钴基合金堆焊焊条的成分、硬度与用途

序号	名称	牌号	国标型号（GB）	相当于 AWS JIS	堆焊金属化学成分（质量分数）/%								堆焊层硬度 HRC	用　途
					C	Cr	W	Mn	Si	Fe	Co	其他元素总量		
1	钴基堆焊焊条	D802	EDCoCr－A－03	ECoCr－A DF－CoCrA	0.70～1.40	25.00～32.00	3.00～6.00	≤2.00	≤2.00	≤5.00	余量	≤4.00	≥40	高温高压阀门、热剪切刀刃堆焊
2	钴基堆焊焊条	D812	EDCoCr－B－03	ECoCr－B DF－CoCrB	1.00～1.70	25.000～32.00	7.000～10.00	≤2.00	≤2.00	≤5.00	余量	≤4.00	≥44	高温高压阀门、高压泵的轴套筒、内衬套筒、化纤设备的斩刀刃口堆焊
3	钴基堆焊焊条	D822	EDCoCr－C－03	ECoCr－C DF－CoCrC	1.75～3.00	25.00～33.00	11.00～19.00	≤2.00	≤2.00	≤5.00	余量	≤4.00	≥53	牙轮钻头轴承、锅炉旋转叶轮、粉碎机刃口、螺旋送料机等磨损部件堆焊
4	钴基堆焊焊条	D842	EDCoCr－D－03	DF－CoCrD	0.20～0.50	23.00～32.00	≤9.50	≤2.00	≤2.00	≤5.00	余量	≤7.00	28～35	热锻模、阀门密封面堆焊

表 4.17-31　等离子喷焊用钴基合金粉末的成分硬度与用途

序号	名称	牌号	相当于 JB	堆焊层化学成分（质量分数）/%							粉末熔化温度/℃	喷焊层硬度 HRC	用　途
				C	Cr	Si	W	B	Fe	Co			
1	钴基合金粉末	F221	F22－45	0.5～1.0	24～28	1.0～3.0	4.0～6.0	0.5～1.0	≤5.0	余量	≈1 200	40～45	高温高压阀门的密封面、热剪切刃口等离子喷焊
2	钴基合金粉末	F221A		0.6～1.0	26～32	1.5～3.0	4.0～6.0	—	≤5.0	余量	≈1 200	40～45	高温高压阀门密封面等离子喷焊
3	钴基合金粉末	F222		0.5～1.0	19～23	1.0～3.0	7.0～9.0	1.5～2.0	≤5.0	余量	≈1 100	48～54	热剪刀片、内燃机阀头、排气阀密封面等离子喷焊
4	钴基合金粉末	F222A	F21－52	0.3～0.5	19～23	1.0～3.0	4.0～6.0	1.8～2.5	≤5.0	余量	≈1 150	48～55	内燃机阀头或凹轮，重压泵封口圈、轧钢机导轨等离子喷焊
5	钴基合金粉末	F223		0.7～1.3	18～20	1.0～3.0	7.0～9.5	1.2～1.7	≤4	余量 Ni11～15	≈1 100	35～45	高温高压阀门密封面的等离子喷焊
6	钴基合金粉末	F224		1.3～1.8	19～23	1.0～3.0	13.0～17.0	2.5～3.5	≤5	余量	≈1 100	≥55	受强烈磨损，冲蚀的高温高压阀门，密封环的等离子喷焊



(3) 铜及铜合金堆焊金属

铜及铜合金堆焊金属分为紫铜、黄铜、青铜和白铜四类。铜基合金堆焊材料有焊条、焊丝和堆焊用带极。铜基合金堆焊金属分别具有较好的耐大气、耐海水和耐各种酸碱溶液的腐蚀，耐气蚀以及耐黏着磨损等性能，但易受硫化物和氨盐的腐蚀，抗磨料磨损性能及高温蠕变性不好，故不适于在高应力磨料磨损及高于200℃的工况条件下工作。铜及铜合金受核辐射不会变成放射性材料，所以在核工业中使用得较多。主要是用来制造要求耐腐蚀、耐气蚀和耐金属间磨损的以铁基材料为母材的双金属零件或修补磨损的工件。作为轴承材料时，当作为摩擦副的软的一方时，要求比匹配表面硬度低HB 50~75，可用磷青铜、较软的铝青铜和黄铜。作为硬的一方，可以用硬的铝青铜。铝青铜由于抗黏着磨损性能特别好，所以用得很广泛。硅青铜不能用作轴承材料。具体成分、硬度和应用见表4.17-32、表4.17-33及表4.17-34。

堆焊工艺对铜合金堆焊金属性能影响极大。从钢或铁母材混入的铁形成硬化剂，为了减小混铁量，往往要取堆焊层厚度6 mm以上部分为工作层。氧-乙炔焰和TIG堆焊比较好。手弧焊和TIG堆焊时电流要尽量小些，惰性气体保护焊能减少合金元素的烧损。要注意基材温度的控制，以避免晶粒过大，使耐蚀性和塑性下降，MIG适合大面积修补焊，而TIG适合小的修补。铜基合金堆焊时，一般不预热。如堆焊件厚度较大，熔合不良时，可预热200℃左右。紫铜的堆焊尽量采用能量集中的热源，例如丝极或带极埋弧堆焊和MIG、TIG填丝堆焊。必要时还要采用400℃左右预热，否则易产生熔合不良缺陷。铝青铜堆焊宜采用TIG填丝焊、MIG和手弧堆焊，不能用氧-乙炔焰堆焊。采用较小的线能量，以防止熔合区在高温的停留时间过长，否则易引起熔合线附近钢基体的母材上出现渗铜裂纹或称液化裂纹。黄铜堆焊时，为了减少锌的蒸发，宜采用热源温度低的氧-乙炔焰堆焊。B30白铜堆焊时，如果堆焊金属中含铁量超过5%，则将引起裂纹。通常先堆焊一层纯镍或蒙乃尔合金做过渡层。堆焊工艺方法宜选带极埋弧堆焊。为获得致密无气孔的堆焊焊道，焊前应仔细清理堆焊表面的油、锈及其他污物。堆焊用焊条应于使用前在200~300℃烘干1 h，堆焊用焊丝表面应干净。

表4.17-32 铜及铜合金电焊条的成分、硬度及用途

序号	名 称	牌 号	国标型号(GB)	堆焊金属化学成分（质量分数）/%									堆焊金属硬度 HRC	用 途
				Sn	Si	Mn	Al	Fe	Ni	Cu	P	其他		
1	纯铜电焊条	T107	ECu	—	≤0.5	≤3.0	Fe+Al+Zn+Ni ≤0.50			>95.0	≤0.30	Pb ≤0.02	—	耐海水腐蚀的碳钢零件堆焊
2	纯铜电焊条	GR1Cu1		0.8	—	2.5	—	—	—	余量	—	—	50	耐海水腐蚀的碳钢零件堆焊
3	硅青铜电焊条	T207	ECuSi-B	—	2.5~4.0	≤3.0	Al+Ni+Zn ≤0.50			>92.0	≤0.03	Pb ≤0.02	HV 110~130	化工机械管道等内衬堆焊
4	磷青铜电焊条	T227	ECuSn-B	7.0~9.0	Si+Mn+Fe+Al+Ni+Zn ≤0.50					余量	≤0.30	Pb ≤0.02	—	磷青铜轴衬、船舶推进器叶片堆焊
5	锡青铜电焊条	GRICu3		6	—	—	—	—	3.5	余量	—	—	100	钢和灰口铸铁堆焊
6	锡青铜电焊条	GRICu12		12	—	—	—	—	—	余量	—	—	120	钢和灰口铸铁堆焊
7	铝青铜电焊条	T237	ECuAl-C	—	≤1.0	≤2.0	6.5~10.0	≤1.5	≤0.5	余量	P+Zn ≤0.5	Pb ≤0.02	—	水泵、汽缸及船舶螺旋桨的堆焊
8	铝青铜电焊条	GRICu6		—	—	—	7.5	3.5	4.5	余量	—	—	150	螺旋浆堆焊
9	铝青铜电焊条	GRICu7		—	—	4.5	7.5	2.3	5	余量	—	—	150	螺旋浆堆焊
10	铝青铜电焊条	GRICu8		—	—	12	6.5	2.0	2	余量	—	—	200	螺旋浆堆焊
11	白铜电焊条	GRICu9		—	—	1.5	—	1.0	30	余量	—	Ti0.2	350	用于在钢上堆焊
12	铜镍电焊条	T307	ECuNi-B	—	≤0.5	≤2.5	—	≤2.5	29.0~33.0	余量	≤0.02	Ti≤0.5	—	12Ni3CrMoV（相当于HY80）钢衬里堆焊



表 4.17-33 铜及铜合金堆焊焊丝的成分、硬度及用途

序号	名称	牌号	国标型号 (GB)	堆焊金属化学成分（质量分数）/%									堆焊金属硬度 HB	用途
				Sn	Si	Mn	Ni	Fe	Al	P	Zn	Cu		
1	紫铜焊丝	HS－201	HSCu	≤1.0	≤0.5	≤0.5	Pb ≤0.02	—	≤0.01	≤0.15	—	≥98.0		
2	黄铜焊丝	HS221	HSCuZu－3	0.8～1.2	0.15～0.35	—	—	—	—	—	余量	59～61	90	低压阀门密封面堆焊
3	黄铜焊丝	HS－222	HSCuZn－2	0.8～1.1	0.04～0.15	0.01～0.50	—	0.25～1.20	—	—	余量	56.0～60.0		轴承和抗腐蚀表面堆焊
4	黄铜焊丝	CuZnB		0.75～1.10	0.04～0.15	—	0.2～0.8	0.25～1.25	—	—	余量	56～60	95	轴承和抗腐蚀表面堆焊
5	黄铜焊丝	CuZnD		—	0.04～0.15	—	9～11	—	—	—	余量	46～50	100	轴承和抗腐蚀表面堆焊
6	硅青铜焊丝	HS211	相当 AWS ERCuSi－A	—	2.8～4.0	0.5～1.5	—	—	—	—	—	余量		机车车辆，重型机器摩擦面的堆焊
7	锡青铜焊丝	CuSnA		4～6	—	—	—	—	—	0.10～0.35	—	余量	70	轴承及抗腐蚀表面堆焊
8	锡青铜焊丝	CuSnC		7～9	—	—	—	—	—	0.05～0.35	—	余量	90	轴承及抗腐蚀表面堆焊
9	锡青铜焊丝	CuSnD		9～11	—	—	—	—	—	0.10～0.30	—	余量	90	轴承表面堆焊
10	锡青铜焊丝	CuSnE		5～7	—	—	Pb 14～18	—	—	0.3～0.5	—	余量	50	轴承表面堆焊
11	铝青铜焊丝	CuAlA－1		—	—	—	—	—	6～9	—	—	余量	125	抗腐蚀表面堆焊
12	铝青铜焊丝	CuAlA－2		—	—	—	—	<1.5	9～11	—	—	余量	150	轴承及抗腐蚀表面堆焊
13	铝青铜焊丝	CuAlB		—	—	—	—	3～4.25	10.25～11.75	—	—	余量	160	轴承及抗气蚀堆焊
14	铝青铜焊丝	CuAlC		—	—	—	—	3～5	12～13	—	—	余量	200	轴承及抗气蚀堆焊
15	铝青铜焊丝	CuAlD		—	—	—	—	3～5	13～14	—	—	余量	250	轴承表面堆焊
16	铝青铜焊丝	CuAlE		—	—	—	—	3～5	14～15	—	—	余量	300	轴承表面堆焊
17	铝镍青铜焊丝	—		—	—	0.6～3.5	4～5.5	3～5	8.5～9.5	—	—	余量	187	耐磨蚀及耐腐蚀表面堆焊
18	铝锰镍青铜焊丝	—		—	—	11～14	1.5～3.0	2～4	7～8	—	—	余量	185	耐磨蚀及耐腐蚀表面堆焊
19	白铜焊丝	—		—	—	0.8	30	0.6	—	—	Ti0.3	余量	—	用于在钢上堆焊



表 4.17-34　铜及铜合金堆焊用带极及粉末的成分及用途

序号	名　称	牌　号	带极及粉末的化学成分（质量分数）/%								用　途
			C	Sn	Mn	Si	P	Fe	Ni	Cu	
1	紫铜带极	ST-2	—	1.0	0.40	0.30	0.08	—	—	98	止推轴承瓦的过渡层堆焊
2	白铜带极	B-30	<0.05	—	0.52	<0.15	<0.006	0.49	31.8	余量	耐海水腐蚀的船舶冷凝器管板堆焊
3	锡磷青铜粉末	F422	—	9.0~11.0	—	—	0.10~0.50	—	—	余量	轴及轴承的等离子堆焊

① 数据取自孙敦武等《铜镍合金 B30 带极埋弧自动堆焊研究》1970.1。

(4) 碳化物复合材料堆焊金属

用于耐磨堆焊的碳化物复合材料数量虽不多，但在严重磨料磨损零件和刀具堆焊中有着重要的地位。虽然很多种类的碳化物（例如钛、铬、铌、钒、钼、钽等的碳化物）都能用于复合材料堆焊层，但到目前为止，用得最多的仍是碳化钨堆焊金属。

碳化钨是硬质合金的重要成分。堆焊用的碳化钨有两类，一类是铸造碳化钨，另一类是以钴或镍为粘接金属的烧结碳化钨。两类碳化钨的特点及堆焊后性能见表 4.17-35。

铸造碳化钨含碳 3.7%~4.0%、钨 95%~96%，它是 WC—W_2C 的混合物。这类合金硬度高，耐磨性能好，但脆性大，易在工作过程中从堆焊层中碎裂并脱落。如果成分中加入钴（5%~15%）其熔点可降低，韧性可增加。如加入一定量的镍基合金粉末，如 F102 等，也可提高堆焊层的韧性和抗冲击性。如对耐磨性要求较高，且为了防止铸造碳化钨的脱落，也可加入 30CrMnSi 等耐磨钢类的合金材料。[18]

烧结碳化钨型硬质合金绝大多数是用钴为粘接金属，牌号为 YG-X（YG 后面的数字代表钴的百分比含量），随钴的百分比含量的提高，硬质合金的硬度下降，韧性提高。此外，碳化钨晶粒越细其耐磨性就越高。各种碳化钨及其合金的物理力学性能见表 4.17-36。

表 4.17-35　铸造碳化钨与烧结碳化钨的特点及堆焊后性能

项　目	铸造碳化钨		烧结碳化钨	
	不规则粒状	球状	不规则粒状	球状
化学组成	WC + W_2C	WC + W_2C	WC + Co	WC + Co
制造方法	熔炼、浇铸后破碎	熔炼后离心法制球	混合、压块、烧结后破碎	混合、制球、烧结
韧性	很脆	脆	低钴型较脆、高钴型较韧	低钴型较脆、高钴型较韧
耐磨料磨损性	优良	优良	优良	优良
硬度（HRA）			89~91	86.5~91
高温抗氧化性	差	差	好	好
堆焊时被铁熔解的程度	较轻	较重	较严重	较严重
供货状态	①②③④⑤	①②⑤	①⑤⑥	①②⑤⑥

① 直接用容器散装供货，供胶焊和炉中钎接堆焊使用。
② 装入铁皮管中供货，供气焊用。
③ 装入铁皮管中并压敷一层药皮供货，供电弧焊用。
④ 混入药皮中，与低碳钢芯组成电焊条供货，供电弧焊用。
⑤ 与铁基、镍基、钴基堆焊合金粉末混合后装入容器散装供货，供粉末等离子堆焊用和氧乙炔喷溶用。
⑥ 与铜基合金一起烧结成条状复合材料堆焊焊条供货，供氧乙炔焰堆焊用，牌号 YD-XX。

表 4.17-36　各种碳化钨及其合金的物理力学性能

物理力学性能	WC	W_2C	WC + W_2C（共晶）	YG3	YG6	YG8	YG11C
硬度 HRA	93~93.7	90~91	—	91	89.5	89	86.5
抗压强度/MPa	1 560~1 620	—	—	—	—	—	—
抗弯强度/MPa	—	—	—	1 200	1 450	1 500	2 100
显微硬度 Hm	1 830	3 000	2 500~3 000	—	1 550	1 450	1 300
熔点/℃	2 600	2 850	—	—	—	—	—
密度/g·cm^{-3}	15.7	17.15	—	15~15.3	14.6~15.0	14.5~14.9	14.0~14.4



碳化钨堆焊金属实质上是含有碳化物硬质颗粒和较软胎体金属的复合材料堆焊层。胎体金属可以是铁基合金（含碳钢及合金钢）、镍基合金、钴基合金和铜基合金。这种复合材料在磨料磨损的工况条件下，胎体金属优先被割削，从而使硬质颗粒在表面上稍有凸起。如果工作表面允许在磨损过程中存在一定的不平度，则碳化钨的切削作用使这类堆焊金属成为耐磨料磨损性能最佳的材料。碳化钨复合材料堆焊在石油钻井及修井设备工具中应用较普遍，其他许多行业如冶金、矿山及煤炭开采、土建施工、建材、制糖、发电等部门中也得到愈来愈广泛的应用。铸造碳化钨和烧结型碳化钨相比，前者硬度高，但质脆，且以铁基金属作为胎体材料。堆焊层易产生裂纹，合金颗粒在工作中也易崩裂脱落。如果所选的胎体足够强韧或选烧结型碳化钨，则堆焊层同时可抗轻度或中度冲击，故在石油钻井、修井及打捞工具等的堆焊中已开始用烧结型碳化钨颗粒和以铜基合金（或镍基合金）做胎体材料取代铸造碳化钨。抗冲击能力还和碳化钨颗粒大小和分布有关。但重度的冲击必须避免。不同的胎体金属还使得堆焊金属具有不同程度高温抗氧化性和抗腐蚀性能。碳化钨堆焊材料的组分成分、硬度及用途见表 4.17-37、表 4.17-38 及表 4.17-39。

表 4.17-37　管装粒状铸造碳化钨焊条及药芯焊丝的组分及用途

序号	牌　号	粒度/目	钢管尺寸/mm		装入的铸造碳化钨与钢管的质量比/%		用　途
			直径	长度	铸造碳化钨	钢管	
1	YZ20～30 g[①] 管装焊条	-20～+30[②]	7	390±0.5	60～70	40～30	铣齿牙轮钻头齿面、钻井用扶正器
2	YZ30～40 g 管装焊条	-30～+40	6	390±0.5	60～70	40～30	铣齿牙轮钻头齿面、钻井用扶正器、吸尘风机叶片、饲料粉碎机锤片
3	YZ40～60 g 管装焊条	-40～+60	5	390±0.5	60～70	40～30	铣齿牙轮钻头齿面，钻井用扶正器，吸尘风机叶片，饲料粉碎机锤片，糖厂蔗刀、甘蔗压榨辊、辊身、辊齿
4	YZ60～80 g 管装焊条	-60～+80	4	390±0.5	60～70	40～30	糖厂蔗刀
5	HSY710 药芯焊丝	—	焊丝直径（mm）4.0		～60	碳钢余量	工具头部、挖泥机叶片、螺旋推进器，输送机螺旋片，刮研机叶片、压榨机等

① g 表示颗粒状。
② -20～+30，表示颗粒能通过 20 目筛孔，不能通过 30 目筛孔，下同。

表 4.17-38　YD 型硬质合金（烧结型）复合材料堆焊焊条牌号、规格及用途

序号	牌　号	烧结碳化钨颗粒尺寸/mm	胎体金属材料	硬质合金颗粒硬度 HRA	外涂钎剂颜色	用　途
1	YD-9.5	6.5～9.5	铜基合金	89～91	深绿	石油工具铣鞋、磨鞋、水力割刀刮刀片等堆焊
2	YD-8	6.5～8	铜基合金	89～91	深蓝	铣鞋、磨鞋、水力割刀刮刀片、刨煤机刨刀等堆焊
3	YD-6.5	5～6.5	铜基合金	89～91	红	铣鞋、磨鞋、刨煤机刨刀、打桩钻头、螺旋钻头、筑路机刀头等堆焊
4	YD-5	3～5	铜基合金	89～91	黄	铣鞋、磨鞋、套铣鞋、取芯钻头、打桩钻头铲斗斗齿、铣槽扩孔器，高炉送料溜板、筑路机刀头等堆焊
5	YD-3	2～3	铜基合金	89～91	粉红	钻井用稳定器、钻杆耐磨带、犁铧、钻杆接头、饲料粉碎机锤片等堆焊
6	YD-10 目	-10～+18 目	铜基合金	89～91	浅绿	钻井用稳定器、钻杆耐磨带、犁铧、钻杆接头、饲料粉碎机锤片等堆焊
7	YD-18 目	-18～+30 目	铜基合金	89～91	浅蓝	钻杆耐磨带、塑料橡胶与皮革的锉磨工具保径耐磨层堆焊
8	YD-30 目	-30～+50 目	铜基合金	89～91	浅黄	橡胶及皮革的锉磨工具保径耐磨层堆焊

注：YD 型焊条尚未纳入标准，由哈尔滨焊接所研制并批量生产。



表 4.17-39 碳化钨堆焊用电焊条的成分、硬度及用途

序号	名称	牌号	国标型号（GB）	堆焊金属化学成分（质量分数）/%								堆焊金属硬度 HRC	用途
				C	W	Cr	Mn	Ni	Si	Mo	其他元素总量		
1	碳钢芯碳化钨电焊条	D707	EDW－A－15	1.50～3.00	40.00～50.00	—	≤2.00	—	≤4.00	—	—	≥60	混凝土搅拌叶片、挖泥机叶片、推土机、泵浦叶片、高速混砂箱
2	纯镍芯碳化钨电焊条	D707 Ni		WC≈55		—	—	余量	—	—	5.00～10.00	≥45	高炉钟斗、烧结扒齿等
3	管装碳化钨芯电焊条 有缝	D717	EDW－B－15	1.50～4.00	50.00～70.00	≤3.00	≤3.00	≤3.00	≤4.00	≤7.00	≤3.00	≥60	三牙轮钻头爪尖，混凝土搅拌叶片，风机叶片，强力采煤滚筒，榨糖机轧辊
	无缝	D717A											

注：堆焊金属化学成分余量为 Fe。

碳化钨复合堆焊材料堆焊工艺的要点是最大限度地防止硬质合金颗粒在堆焊过程中发生分解、溶解甚至熔化，以保持碳化钨原有的高耐磨性。因此最多的是采用温度较低的氧-乙炔焰堆焊。适用于这种堆焊方法的有管装粒状铸造碳化钨焊条，它是把不同粒度（8～100目）的 WC-W_2C 颗粒装在钢管中直接使用，碳化钨和钢管的质量比为 60:40。氧-乙炔焰堆焊时，碳化钨熔解少，而且碳化钨分布易控制，因而堆焊层耐磨性好。也可把铸造碳化钨颗粒先用水玻璃粘在工件表面，然后用氧-乙炔焰加热，使基体表面熔化，碳化钨颗粒即沉积于工件表面上。另一种适用于氧-乙炔焰堆焊的碳化钨堆焊材料是 YD 型硬质合金（烧结型）堆焊焊条，它是把碳化钨与铜基合金一起烧结成条状复合堆焊焊条，它使用的气焊焊嘴应比焊普通碳钢用的稍大，具体堆焊工艺可参见 YD 焊条产品说明书。氧-乙炔焰堆焊时操作中应避免堆焊熔池温度过高和停留时间过长，以防止堆焊层产生气孔，过烧或剥落等缺陷。焊后应缓慢冷却，防止产生裂纹。

采用氧-乙炔焰堆焊，虽然能使硬质合金颗粒在堆焊过程中基本不熔化，但生产率太低，特别对大型工件堆焊，缺点更为突出，因此，近年来为了提高生产率，钨极氩弧堆焊、等离子弧堆焊和电焊条堆焊等电弧堆焊法也在生产中多有应用[18]。电弧堆焊后，胎体变成含有碳和钨的工具钢，最高硬度可达 HRC65。它对未熔化的碳化钨颗粒有很好的支撑作用。它的热硬度和碳化钨熔解多少有关，胎体中含钨多则抗热性好，但由于碳化钨颗粒易氧化，工作温度不能超过 650℃。把管装粒状铸造碳化钨焊条外面压敷一层药皮即成碳化钨电焊条堆焊，这种堆焊时大多数碳化钨熔解，只有少量沉淀在熔池底部，加上母材的熔化和稀释作用，堆焊层成为被钨合金化了的铸铁，因而硬度很高。但抗磨料磨损性能比氧-乙炔焰堆焊的碳化钨堆焊层有所下降。由于生产率高，在挖掘运土设备的堆焊中常用。不论哪种方法堆焊的碳化钨堆焊层都不能机加工，磨削也很困难。

（5）氧-乙炔焰喷熔用自熔性合金粉末

喷熔用自熔性合金粉末具有较低的熔点，良好的自熔剂性和对母材有很好的润湿性等特点。氧-乙炔焰喷熔层表面光滑平整、厚度薄而均匀，故常用于要求喷熔层厚度为 0.5～2 mm 的场合。喷熔用自熔性合金可分为镍基、钴基、铁基和含碳化钨自熔性合金等四个系列。其中镍基合金又可分为镍硼硅系和镍铬硼硅系，前者喷熔层硬度不高，韧性好，耐急冷急热，在 600℃时仍具有良好的耐磨性和耐腐蚀性，故主要用于硬度不允许太高，但能急冷急热的模具制造和修复。也可对铸铁、钢、不锈钢工件的裂损处进行修复。镍铬硼硅系由于添加了铬，提高了喷熔层的抗氧化、耐热、耐腐蚀和耐磨性能，它除了用于耐高温或者磨料磨损和高温抗氧化联合作用的场合外，在海水、中性盐、酸性盐、冷硼酸、10%热硫酸、冷浓氢氟酸中都有良好的耐蚀性能。因此作为耐蚀的保护层得到广泛应用。钴基自熔性合金主要是钴铬钨硼硅系，铬有强化和提高抗氧化性作用；钨提高了喷熔层的热强性和高温硬度，并有时效硬化作用；硼可改善合金的自熔性，也能增加合金硬度。该系列合金比镍基合金有更好的耐热性和抗高温氧化性。800℃时仍保持一定的硬度，有良好的耐磨损，耐腐蚀性能，具有最佳的综合性能，但由于价格较昂贵，一般只在要求 700℃的高温耐磨和耐腐蚀性时才用。铁基自熔性合金粉末多为奥氏体不锈钢型，镍含量一般大于 28%，与镍基自熔合金相比，除在工艺性及高温性能方面稍差外，其他性能相差不大，而价格比镍基合金低，因此可以在很大范围内取代钴基自熔合金。含碳化钨自熔性合金粉末是由喷熔用的镍基、钴基或铁基自熔性合金粉末与一定比例的铸造碳化钨或烧结碳化钨颗粒组成。它们具有十分优良的耐磨粒磨损性能。因此用于严重磨料磨损的场合。由于不同牌号合金有不同的胎体金属，因此它们还兼有各自胎体的使用性能。氧-乙炔焰喷熔用自熔性合金粉末的成分、硬度和用途见表 4.17-40。

自熔性合金粉末氧-乙炔焰喷熔分为一步法和二步法。一步法时喷粉与重熔几乎是同时进行的。工件的热输入量较小，焊层表面光滑平整度稍差，也可机械化操作，适于大工件上的小面积或小尺寸零部件的喷熔，主要用于喷熔铜、镍和不锈钢等耐腐蚀的沉积层。二步法时在零件待喷熔的整个面积上先均匀喷粉，达到一定厚度后再重熔。适用于要求表面喷熔层厚度均匀、光滑平整的工件，特别适用于尺寸大的零件和圆柱面的喷熔。主要喷熔钴基、镍基合金。自熔性合金粉末的喷熔主要包括工件表面清理、预热、喷熔及喷熔后的冷却等工艺过程。



表 4.17-40　氧－乙炔火焰喷熔用自熔合金粉末的成分、硬度及用途

序号	名称	牌号	标准型号	自熔合金粉末的化学成分（质量分数）/%										喷熔层硬度 HRC	粉末熔化温度 /℃	用途
				C	Cr	Si	B	W	Fe	Ni	Co	Cu	Mo			
1	镍基	FNi－01		<0.10	—	3.0～4.0	1.0～2.0	—	<1.5	余量	—	—	—	20～30	—	玻璃模具、塑料橡胶模具表面喷熔
2	镍基	FNi－02		<0.10	—	2.8～3.7	1.9～2.6	—	<2.0	余量	—	—	—	30～35	—	玻璃模具、塑料橡胶模具表面喷熔
3	镍基	F101[1]	相当 JBF11－40	0.30～0.70	8.0～12.0	2.5～4.5	1.8～2.6	—	≤4	余量	—	—	—	40～50	1 000	泵转轮、柱塞、耐高温、耐蚀阀门、玻璃刀、搅拌机部件、玻璃模具的棱部分喷熔
4	镍基	F102[1]	符合 JBF11－55	0.60～1.0	14.0～18.0	3.5～5.5	3.0～4.5	—	≤5	余量	—	—	—	≥55	1 000	耐蚀耐高温阀门、模具、泵转子、柱塞等喷熔
5	镍基	F103	相当 GBFZNCr－25B	≤0.15	8.0～12.0	2.5～4.5	1.3～1.7	—	≤8	余量	—	—	—	20～30	1 050	修复和预防性保护在高温或常温条件下的铸铁件，如玻璃模具、发动机汽缸、机床导轨等喷熔
6	镍基	F104	相当 GBFZNCr－55A	0.60～1.0	14.0～18.0	3.5～5.5	3.5～4.5	—	≤5	余量	—	2.0～4.0	2.0～4.0	≥55	1 050	对形状不规则和要求喷熔层厚度超过 2.5 mm 的零件较为适宜。如耐蚀泵零件、柱塞、耐蚀阀门等的喷熔
7	镍基	F106		≤0.15	8.0～12.0	2.5～4.5	1.7～2.1	—	≤8	余量	—	—	—	30～40	1 050	汽门、齿轮、受冲击滑块等的喷熔
8	镍基	F109		0.40～0.80	14.0～16.0	3.5～5.0	3.0～4.0	—	≤15	余量	—	24.0～26.0	—	≥50	1 000	需磨擦无火花且耐磨的起重、装卸机械。如铲车铲脚、挂钩等，以及防磨耐蚀零件的喷熔
9	钴基	F202[1]		0.50～1.0	19.0～23.0	1.0～3.0	1.5～2.0	7.0～9.0	≤5	—	余量	—	—	48～54	1 080	要求在 700℃以下具有良好耐磨、耐蚀性能的零件，如热剪刀片、内燃机阀头或凸轮、高压泵封口圈等的喷熔
10	钴基	F203[1]		0.70～1.3	18.0～20.0	1.0～3.0	1.2～1.7	7.0～9.5	≤4	11.0～15.0	余量	—	—	35～45	1 080	各种高温高压阀门，热鼓风机的加热交错部位等的喷熔
11	钴基	F204		1.3～1.8	19.0～23.0	1.0～3.0	2.5～3.5	13.0～17.0	≤5	—	余量	—	—	≥55	1 080	受强烈磨损的高温高压阀门密封环等的喷熔
12	铁基	F301	符合 GBFZFeCr05－40H	0.40～0.80	4.0～6.0	3.0～5.0	3.5～4.5	—	余量	28.0～32.0	—	—	—	40～50	1 100	农机、建筑机械、矿山机械易磨损部位、如齿轮、刮板、铧犁、车轴等的喷熔
13	铁基	F302	符合 GBFZFeCr10－50H	1.0～1.5	8.0～12.0	3.0～5.0	3.5～4.5	—	余量	28.0～32.0	—	—	4.0～6.0	≥50	1 100	农机、建筑、矿山机械易磨损零件、如耙片、犁齿、刮板、车轴等的喷熔
14	铁基	F303	符合 GBFZFeCr05－25H	0.40～0.80	4.0～6.0	2.5～3.5	1.0～1.6	—	余量	28.0～32.0	—	—	—	26～30	1 100	受反复冲击的或硬度要求不高的零件，如铸件修补、齿轮修复等的喷熔

续表 4.17-40

序号	名称	牌号	标准型号	自熔合金粉末的化学成分（质量分数）/%										喷熔层硬度(HRC)	粉末熔化温度/℃	用途
				C	Cr	Si	B	W	Fe	Ni	Co	Cu	Mo			
15	铁基	F306		0.40~0.60	5.0~7.0	3.0~4.0	1.5~2.0	—	余量	38.0~42.0	—	—	2.0~4.0	30~40	1 050	小能量多冲击条件下的零件，如枪械，齿轮、汽门等的喷熔
16	铁基	F307	符合 GBFZFeCr05-25H	0.40~0.80	4.0~6.0	2.5~3.5	1.1~1.6	—	余量	28.0~32.0	—	—	—	26~30	1 100	铁路钢轨擦伤、低塌等缺陷的修复
17	含碳化钨型	F105 Fe	符合 JBF1160	F102+35% WC										≥55	1 000	抗磨料磨损零件，如导板、刮板、风机叶片等的喷熔
18	含碳化钨型	F105		F102+50% WC										≥55	1 000	强烈抗磨料磨损零件，如导板、刮板、风机叶片等的喷熔
19	含碳化钨型	F108		F102+80% WC										≥55	1 000	抗强烈磨损和无需加工的零件，如挖泥船耙齿、风机叶片、刮板等的喷熔
20	含碳化钨型	F205		F204+35% WC										≥55	1 080	在700℃以下抗强烈磨损的零件的喷熔
21	含碳化钨型	F305		F302+25% WC										≥50	1 100	农机、建筑机械、矿山机械中承受土砂磨损的零件，如犁刀、刮板、铲齿等的喷熔

① F101、F102、F202、F203成分同于等离子喷熔用的F121、F122（表4.17-26）和F222、F223（表4.17-30），但粒度大小不同。氧-乙炔焰喷熔时若采用中小型焊枪可选用-0.106 mm的粉末，若用大型焊枪时，宜选用-0.050~+0.106 mm的粉末。

2.7 堆焊合金的选择

选择堆焊合金是一项较复杂的工作。只有正确选用堆焊合金，才能保证发挥其最好的工作性能，同时又最大限度地节省合金元素。选择堆焊合金，首先应考虑工件的工况条件，如磨损的类型（磨料磨损、金属间磨损、冲蚀等）、受冲击力的大小、工作温度和工作介质等；其次是经济的合理性，应把堆焊材料的价格和堆焊件投入使用后产生的经济效果同时考虑。此外，堆焊件的材质、批量、拟采用的堆焊方法和堆焊工艺等也是考虑的因素。

堆焊工件在使用中的工况条件差别很大，有磨损、腐蚀、冲击等，而且经常不是单一因素起作用，所以满足工况条件的要求和堆焊合金性能之间不可能存在简单的关系。因此简单地按一些条件试验对堆焊合金进行分等级并据此确定选用的材料的做法在工程上是不可取的。应该在仔细分析工作条件的前提下，并对堆焊合金的物理、化学、力学和磨损等数据进行综合分析，无论是试验室或现场采集到的各种数据都必须重复性好，且能分出等级，并和工作时的实际行为，包括使用寿命的现场考核结果等应尽可能有相应的关系。

比如在选择耐磨堆焊合金时，单一从堆焊层的硬度、焊层的合金含量或堆焊材料价格的高低出发，确定所用的堆焊合金都是不合理的。因为堆焊层的硬度和耐磨性之间并不是线性关系。而且不同磨损类型对材料性能的要求是不一样的，再加上在磨损的同时常伴有冲击、腐蚀、疲劳和温度等因素的影响，因此增加了合金选择的复杂性；合金含量的高低也不能简单代表耐磨性的好坏，组织结构与合金成份一样对耐磨性有很大影响，盲目提高合金含量只能导致堆焊成本的增加，造成不必要的浪费。同样，价格的高低更不能作为堆焊材料好坏的标准，相反，应在满足工作条件要求的前提下尽量采用价廉的合金，如在纯磨料磨损条件下工作的工件，绝不应选用昂贵的钴基合金。

一般说，随着堆焊金属中碳化物或其他硬质相含量的增加，耐磨料磨损性能提高，耐冲击能力下降。所以在要求最大抗磨料磨损能力时应选用含碳化钨等硬质合金的堆焊金属。合金铸铁耐磨性比碳化钨差些，但由于价格较低，所以在要求抗磨料磨损性能较高时，用得也很普遍，如推土机、高炉料钟等零件的磨损面堆焊。另外，合金铸铁堆焊层的耐热性比碳化钨好，在要求抗热磨损的场合，如炼焦炉和铁矿烧结炉滑道也常用合金铸铁堆焊层。当工作条件是伴有冲击的磨料磨损时，根据冲击载荷递增的顺序分别选用合金铸铁、马氏体钢和奥氏体高锰钢。特别是对耐腐蚀性和耐热性要求不高时，价廉的马氏体钢用得最普遍。因为它硬度变化范围大（HRC22~64），易满足不同的冲击要求。高锰钢虽然能够耐重度的冲击，但在同时存在磨料磨损时，必须有一段时间的冲击变形后，才能建立起冷作硬化层，所以常在高锰钢工件表面堆焊高铬合金铸铁保护层，提供初期的保护。在腐蚀介质条件下工作，常选用不锈钢和铜基合金，有时也用镍基合金。当同时兼有腐蚀和磨损时，推荐用钴基或镍基堆焊合金。而对于既要耐磨、又需抗氧化，或者在热腐蚀条件下工作时，推荐用钴基堆焊金属或者含金属间化合物、碳化物等硬化相的镍基堆焊合金。在耐磨性和高温强度都有要



求的场合，则选用钴基堆焊金属，尤以含 Laves 相的钴基金属最合适。当磨料磨损＋冲击＋热抗力的场合，可用含铬5%的马氏体钢，如果要求更高的热抗力和热强度则选用马氏体不锈钢，也可用18-8不锈钢。

表4.17-41是根据工作条件选择堆焊合金的一般规律，图4.17-2为不同类型堆焊金属性能的定性比较。需要指出的是由于堆焊工件条件十分复杂，而各类堆焊金属性能又互相交叉，因此它们只能作为选择堆焊合金的参考。堆焊材料的最后确定还需在仔细分析工况条件、全面了解堆焊材料的各项性能的前提下，初选几种材料，通过堆焊件的现场考核试验，综合考虑寿命和成本最后选定。

表4.17-41 堆焊金属选用的一般规律

工作条件	可选用的堆焊金属
高应力金属间磨损	亚共晶钴基合金、含金属间化合物的钴基合金、镍基合金或某些铁基合金
低应力金属间磨损	堆焊用低合金钢或铜基合金、铁基合金
金属间磨损＋腐蚀或氧化	大多数钴基或镍基合金
高应力磨料磨损	高铬马氏体铸铁、碳化钨、高锰钢
低应力磨料磨损、冲击浸蚀、磨料浸蚀	高合金铸铁（高硬度的马氏体合金铸铁、高铬合金铸铁）
低应力严重磨料磨损	碳化物
气蚀	不锈钢、钴基合金
严重冲击	高锰钢
严重冲击＋腐蚀＋氧化	亚共晶钴基合金
高温下金属间磨损	亚共晶钴基合金，含金属间化合物钴基合金或镍基合金
凿削磨损	奥氏体锰钢、高铬合金铸铁、马氏体合金铸铁
热稳定性、高温蠕变强度	钴基合金、含碳化物镍基合金

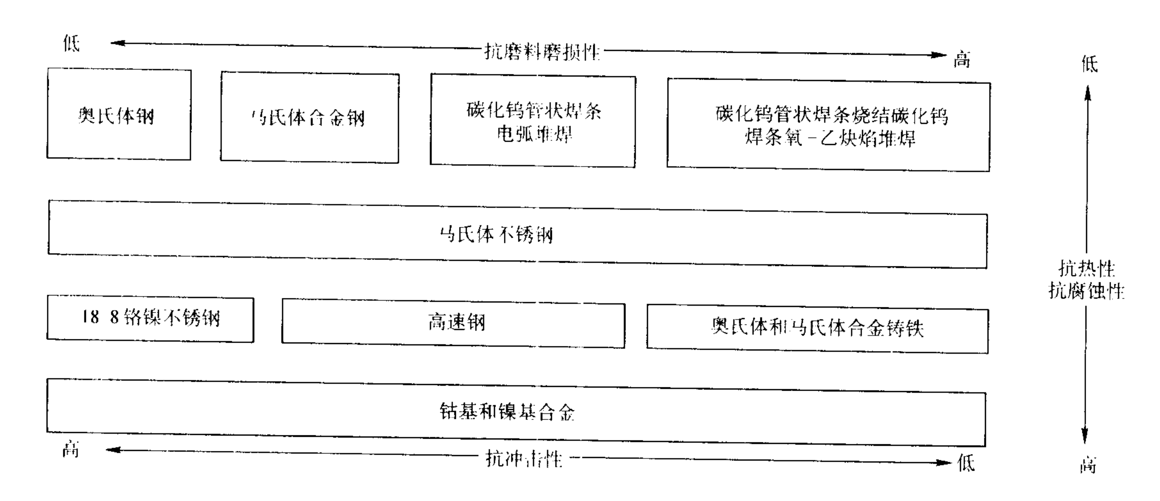


图4.17-2 不同类型堆焊金属性能比较

经济的合理性要综合考虑堆焊的成本和工件投入使用后产生的经济效果。堆焊成本包括堆焊材料的成本、设备、运输、人工费等。一般来说，铁基堆焊材料最便宜，镍基堆焊材料较贵，而钴基堆焊材料最贵。考虑堆焊材料价格时，应同时考虑堆焊件的批量及拟采用的堆焊方法的熔敷速度和熔敷效率。当工件批量大时，合理选择堆焊材料意义更大。

在选择堆焊合金时，一般按下列几个步骤进行：

1）分析工作条件，工件可能的失效类型及对堆焊金属的要求；

2）按一般规律列出几种可供选择的材料；

3）分析待选材料和基体材料的相容性（包括热应力和裂纹），初步选定堆焊工艺；

4）堆焊零件的模拟试验或现场试验；

5）综合考虑使用寿命和成本，最后选定堆焊合金；

6）选择堆焊方法、制定堆焊工艺。

编写：单际国（清华大学）
董祖珏（机械科学研究院）



参考文献

1 中国机械工程学会焊接学会，焊接研究所，黄文哲主编．焊工手册：手工焊接与切割．第19章．第二版．北京：机械工业出版社，1991

2 周振丰主编．焊接冶金学（金属焊接性）．北京：机械工业出版社，1992

3 周振丰．铸铁焊接冶金与工艺．北京：机械工业出版社，2001

4 中国机械工程学会焊接学会．焊接手册：第2卷，材料的焊接．北京：机械工业出版社，1992

5 中国机械工程学会焊接学会．焊接手册：第2卷，材料的焊接．第2版．北京：机械工业出版社，2001

6 中国机械工程学会，机械工程手册编委会．机械工程手册：机械制造工艺及设备卷（一）．第2版．北京：机械工业出版社，1996

7 邹增大主编．焊接材料、工艺及设备手册．北京：化学工业出版社，2001.8

8 胡传忻主编．实用焊接手册．北京：北京工业大学出版社，1998.12

9 丁庆如．碳钢用实芯焊丝的生产使用现状．焊管，20（5），1997.9：7~11

10 傅积和，孙玉林主编．焊接数据资料手册．北京：机械工业出版社，1994.6

11 中国标准出版社，锅炉技术标准规范汇编（第一卷），2002年7月

12 国家质量监督检验检疫总局发布，GB/T 3429—2002《焊接用钢盘条》

13 国家质量监督检验检疫总局发布，GB/T 10045—2001《碳钢药芯焊丝》

14 国家质量技术监督局发布，GB 712—2000《船体用结构钢》

15 国家技术监督局发布，GB 6653—1994《焊接气瓶用钢板》

16 国家技术监督局发布，GB/ 11352—1989《一般工程用铸造碳钢件》

17 田志凌．面向21世纪的钢铁材料及其焊接技术［C］，金属焊接性与焊接材料委员会会议文件，2000.10

18 J.Kim，Factors Controlling Cold Crack Susceptibility of Weld Metal［C］，First Int.Conf.on Advanced Structural Steels，May，2002，Tsukuba，Japan，121~122.

19 S.Aihara and K.Okamoto.Influence of local brittle zones on HAZ toughness of TMCP Steels［C］，Proc.AWS Int.Conf.on Metallurgy，Welding and Oualification of Microalloyed Steel Weldments，Houston，November 1990，402~426.

20 C.Shiga，Effects of steelmaking，alloying and rolling variables on the HAZ structure and properties in microalloyed plate and ling pipe［C］.AWS Int.Conf.On Metallurgy，Welding and Qualification of Microalloyed（HSLA）Steel Weldments，Houston，Nov.1990，327~350.

21 D.L.Olson，S.Liu and G.R.Edwards，Physical Metallurgical Concerns in the Modelling of Weld Metal Transformations，mathematical modelling of weld phenomena，The Institute of Materials，1996

22 薛振奎，隋永莉．国内外油气管道焊接技术发展综述，2003

23 桂赤斌．焊接热循环过程晶粒生长动力学研究．华中理工大学博士学位论文，1990，30~32

24 屈朝霞．新一代钢铁材料焊接HAZ奥氏体晶粒长大规律的研究．天津大学博士学位论文，2000

25 Y.W.Shi，S.Y.Sun，H.Murakawa，Y.Ueda.Finite element analysis on relationships between the J-integral and CTOD for stationary cracks in welded tensile specimens.International Journal of Pressure Vessels and Piping，1998，75(3)：197~202

26 W.Tang，Y.W.Shi.Influence of crack depth and strength matching on deformation and plastic zone for welded joint specimen，International Journal of Fracture，1995，74（1）：77~87

27 田志凌，何长红，张晓牧，邹刚，屈朝霞．400 MPa级超细晶粒钢的焊接．焊接学报，2001，22（6）：1~3

28 D.Swenson，M.James.FRANC2D/L：a crack propagation simulator for plane layered structure，Version 1.4，User's guide，Kansas State University，Manhattan，KS，US.

29 H.Hobbacher.Fatigue design of welded joints and components，Recommendations of IIW joint working group.XIII-1539-96/XV-845-96，Abington Publishing，1996

30 霍立兴．焊接结构的断裂行为．北京，机械工业出版社，2000

31 太田昭彦等．低相变温度焊接材料提高焊接接头的疲劳强度．日本高强高韧钢最新进展内部资料54，1998

32 Huo Lixing，et al.Investigation on Improving Fatigue Properties of Welded Joints by Ultrasonic Peening Method，4th International Conference on Fracture & Strength of Solids.Pohang，Korea，2000

33 陈家本．面向二十一世纪——对船舶焊接技术综合分析研究.2003

34 W Bendick.Stand der Entwicklung neuer Rohr werkstoffe für den Kraftwerksbau in Deutsch land und Europa VGB Kraftwerkstechnik 1997 №5

35 P.J.Ennis Die Eigenschften des 9% – chrom – slahles vom Typ 9Cr – 0.5Mo – 1.8W – V – Nb im Hinblick auf seine verwendung als Rohrleitungs – und Kesselbaustahl VGB Kraftwerkstechnik 1998 №1

36 B.Hahn.Einsatz des stahles X10CrMoVNb91 im Rahmen von Anlagenertüchtigungen VGB Kraftwerkstechnik 1997 №3

37 H.Schabereiter überblick über schweibang warmfester und hochwarmfester stähle für den Kraftwerksbau Schweiss – prüftechnik 1997 №10

38 Qiurong Chen，New Boiler and Piming Marerials VGB Power Tech 2003 NO 11

39 Peter Seliger，zeitstandfestigkeit vom SchweiBimdungen aus x10CrMoVNb 9 – 1（P91）Schwe ssen und Schneiden 2002 NO 6

40 J. MuBmann，Wamebehandlung beim SchweiBen in RohrheiFungsban Prktiker 2002 NO.6

41《中国航空材料手册》编辑委员会．中国航空材料手册：第2卷，变形高温合金，铸造高温合金．第2版．北京：中国标准出版社，2002

42 郑运荣，张德堂．高温合金与钢的彩色金相研究．北



京：国防工业出版社，1999

43 李成功，傅恒志，于翘等．航空航天材料．北京：国防工业出版社，2002

44 《航空制造工程手册》总编委会．航空制造工程手册：焊接．北京：航空工业出版社，1996

45 李蕴欣．江贵藻．国外 Incoloy 903 合金零件的组织和性能的分析．航空材料学报（专题资料），1992：27~33

46 张启运，庄鸿寿主编．钎焊手册．北京：机械工业出版社，1999

47 李晓红，钟群鹏，曹春晓．K403 与 DZ4 高温合金的大间隙钎焊．航空材料学报，2003，23（4）：10~15

48 李晓红，钟群鹏，曹春晓，毛唯．DD3 单晶合金对开叶片 TLP 扩散焊工艺探索研究．材料工程，2003，（6）：3~6

49 李晓红，钟群鹏，曹春晓．DD3 单晶合金瞬间过渡液相扩散焊接头组织与性能．航空材料学报，2003，23（2）：1~15

50 焦好军．2195 铝锂合金的焊接性研究 航天工艺与材料研究所 2002.8

51 夏德顺．含钪的铝和铝锂合金 航天工艺 1999，4

52 В. И. Рязанцев Подготовка поверхностиалюминиевых сплавов под дуговую сварку Сварочное производство 2002 No4

53 范平章．铝合金表面状态对焊接气孔的影响 航天工艺，2000，2

54 彭云．铝合金焊接接头碾压强化综述 轻合金加工技术 1995，10

55 柯新和．铝合金焊接结构的尺寸稳定性．航天工艺，1996，5

56 林 W.E 等．铝锂合金焊接裂纹敏感性．导弹与航天运载技术，1996，5

57 夏德顺．铝锂合金的焊接工艺．航天工艺，1993，No.2

58 霍晓等．8090 铝锂合金焊接裂纹敏感性的研究．焊接，1992，3

59 夏德顺．高强可焊 1460 铝锂合金．航天工艺，1999，10

60 T.S.Srivatsan．轻型铝锂合金的焊接．国外导弹与航天运载器 1992，5

61 孙忠绍等．航天低温贮箱箱底焊接工艺．航天工艺，1999，12

62 Partnership-Customer Service and Problam Solving Alloy 2319 Weld Data Sheet AlcoTechnics 2003

63 丁韦等．铝合金薄板脉冲 MIG 焊气孔研究．焊接技术，1995，4

64 潘立民．铝合金双丝焊接法的开发．焊接技术，1995，6

65 邦达列夫．铝合金电子束焊接缺陷的预防和排除．航天工艺，1999，8

66 A.Belmomondo etc.Application of variable polarity plasma arc welding to space modules fabrication Conference on Spacecraft Structures，Materials & Mechanical Testing 27-29 March 1996

67 H.Zhao etc.Current issues and problems in laser welding of automotive aluminium alloys International Materials Reviews 1999，Vol.44 No.6

68 Seiji KATAYAMA etc.Evaluation of Mechanical Properties of Laser-Welded Aluminium Alloy X-28347 Proceedings of Laser Institute of America Vol.83 Part 2 1997

69 Friedrich Dausinger Laser welding of aluminium alloys：from fundamental investigation to industrial application X-30337 proceeding of SPIE Vol.3888（1999）

70 Guoliang Xu etc Laser Keyhole welding on Aluminium alloys X-30337 High-power laser in mamufacturing Proceeding of SPIE Vol.3888（2000）

71 Cornelius Schinzel etc Laser welding of aluminium-extended processing potential by different wire positions X-30337 proceeding of SPIE Vol.3888（2000）

72 A.Twardowska etc Laser welding of al-Li-Mg-Zr alloy X-31275 Proceedings of SPIE Vol.4238（1999）

73 K.H.Leong etc Laser Welding of Aluminium Alloys X-28509 Proceedings of SPIE（1997）

74 Weldability of aluminium-lithium alloy 2090 using laser welding P.A. molian etc Journal of materials sience 25（1990）3347-3358

75 王忠平等．铝锂合金钎焊反应钎剂的研究．航空工艺技术，1997，4

76 雷伊生．铝及铝合金钎焊后的清洗和防护．航天工艺，1990，6

77 Beate Heinz etc Characterization of a FSW Al alloy 6013 Metallurgical and materials Transaction B Vol.33B June 2002

78 K.J.Jata etc Friction-Stir Welding Effects on Microstructure and Fatigue of Aluminum 7075-T7451 Metallurgical and materials transactions A Vol 31A，Sep.2000

79 Yutaka S.Sato etc Distribution of Tensile Property and Microstructure in Friction Stir Weld of 6063 Aluminum Metallurgical and materials transactions A Vol 32A，Dec.2001

80 Yutaka S.Sato etc Parameters Controlling Microstructure and Hardness during Friction-Stir Welding of Precipitation-Hardenable Aluminum Alloy 6063 Metallurgical and materials transactions A Vol 33A，Mar.2002

81 J.H.Ouyang etc Material Flow and Microstructure in the Friction Stir Butt Welds of the Same and Dissimilar Aluminum Alloys Journal of Materials Engineering and Performance Vol.11（1）Feb.2002

82 K.V.Jata Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys Materials Science Forum Vols.331-337（2000）

83 C.G.Rhodes etc Effects of Friction Stir Welding on Microstructure of 7075 Aluminum Scripta Materialia，Vol.36，No.1 1998

84 Wusheng Hu etc Corrosion and Environment-Assisted Cracking Behavior of Friction Stir Welded Al2195 and 2219 Alloys Materials Science Forum Vols.331-337（2000）

85 S.Benavides etc Low-Temperature Friction-Stir Welding of 2024 Aluminum Scripta Materialia，Vol.41，No.8 1999

86 G.Liu etc Microstructure Aspects of the Friction-Stir Welding of 6061-T6 Aluminum Scripta Materialia，Vol.37，No.3 1997

87 Marshall-designed retractable pin tools（NASA/MSFC）

88 Marshall Space Flight Center，Alabama

89 Friction Stir Welding-Process advantages TWI 2003

90 M.W.Mahoney etc Properties of Friction-Stir-Welded 7075 T651 Aluminum Metallurgical and materials transactions A Vol 29A，July 1998

91 Paula J Hartley Friction Plug Weld repair of Space shuttle external tank Welding & Metal Fabrication Sep.2000

92 焦好军，梁德彬．高强铝合金塞补焊工艺研究．航天工艺与材料研究所，2002，10

93 顾钰熹．特种工程材料焊接．辽宁：辽宁科学技术出版社，1998.8

94 A Munitz etc Resisteance Spot Welding of Mg－AM50 and Mg－AZ91D Alloys Magnesium Technology TMS 2002

95 Toshikatsu Asahina etc Electron Beam Weldiability of Pure Magnesium and AZ31 Magnesium Alloy Materials Transactions，



Vol.42，No11，2001

96 U.Draugelates etc Joining Technologies for Magnesium Alloys Magnesium Alloys & Their Applications edited by B.L.Mordike 1998

97 A.Weisheit etc Laser Welding of Various Magnesium Alloys - Microstructure and Mechanical Properties Magnesium Alloys & Their Applications published in Germany 1998

98 邢丽等．镁合金薄板的搅拌摩擦焊工艺．焊接学报，Vol.22，No6，2001

99 美国焊接学会．焊接手册：第4卷，金属及其焊接性．北京：机械工业出版社，1991

100 《中国航空材料手册》编辑委员会．中国航空材料手册，第4卷，钛合金、铜合金，第2版．北京：中国标准出版社，2001

101 王者昌．TC4合金焊接时氢的行为．西安：第六届全国焊接学术会议，第三集．1990，262～266

102 胡振海，朱铭德，张建浩．钛合金与铌合金的真空电子束焊接工艺研究．航天工艺，2001，(1)：10～15

103 宋西平，邵潭华，王士元，刘效方，孟卫如．钛合金惯性摩擦焊接头断裂韧性的研究．航空材料学报，1996，16 (2)：44～49

104 刘效方等．箔材钛合金液相界面扩散焊研究．材料工程，1991，(6)：23～26

105 赵岩，范洪连，吴忠玉，董大昌．Cu为中间夹层TB2钛合金扩散焊接的试验研究．机械工程师，1994，(3)：6～7

106 孙荣禄，张九海，黄喜东．中间过渡金属V+Cu对钛合金与不锈钢扩散焊接头性能的影响．焊接，1997，(2)：2～6

107 孙荣禄，杨文杰，张九海．钛合金与不锈钢扩散焊接头的组织和性能．焊接技术，1997，(4)：4～6

108 徐国庆，曾岗，牛济泰，耿雪菲．Al/Ti的扩散焊工艺．焊接，2000，(3)：21～24

109 王志成．钛合金的超塑性成型与扩散焊接．材料导报，1996，增刊：36～40

110 胡广文，刘效方．钛合金液相界面扩散焊工艺过程机理的探讨．稀有金属，1996，增刊：54

111 程耀永，李晓红，毛唯，马文利．钛合金栅格翼的真空钎焊．第九届全国钎焊与扩散焊技术交流会论文集，扬中，1996

112 常辉，罗国真．钛合金用钎焊料的发展评述．稀有金属材料与工程，1995，24 (1)：15～20

113 程耀永，马文利，王金铭，李晓红．利用Ti基混合粉反应钎料钎焊TC4合金．无锡：第十届全国钎焊与扩散焊技术交流会论文集，1998.11：254～257

114 郭万林，李天文．钛合金钎缝中元素的扩散行为研究．稀有金属，2001，25 (5)：345～348

115 李晓红，毛唯，邓继雄．Al/Ti真空钎焊工艺研究．新材料热加工新工艺技术研讨会．河北正定，1991

116 K.Keshava Murthy，N.C.Sekhar and S.Sundaresan.Thermomechnical processing of welded α + βTi-Al-Mn alloy and its effect on microstructure and mechanical properties.Materials Science and Technology，1997，13 (4)：343～348

117 Ch.Radhakrishna and K.Prasad Rao.Comparative study on impact toughness of gas tungsten arc and electron beam weld metals of Ti-6Al-4V.Materials Science and Technology，1997，13 (12)：1057～1062

118 C. M.Гуревич.Справочник по сварке цветных металлов.2-е издание.КИЁВ：НАУКОВА ЦУМКА，1990

119 曾乐主编．现代焊接技术手册．上海：上海科学技术出版社，1993

120 中国机械工程学会焊接学会．焊接手册，第1卷，焊接方法及设备．第2版．北京：机械工业出版社，2001

121 Moore，T.J.Preliminary study on pressure brazing and diffusion welding of Nb-1Zr to inconel 718.Welding Journal.1990，69 (3)：98～102

122 金志浩，高积强，乔冠军．工程陶瓷材料．西安：西安交通大学出版社，2000

123 陈沛生．陶瓷与金属的钎焊．钎焊手册，北京：机械工业出版社，1999

124 陈贻瑞，王建．基础材料与新材料．天津：天津大学出版社，1994

125 吴爱萍，邹贵生，任家烈．先进结构陶瓷的发展及其钎焊连接技术的发展．材料科学与工程，2002，20 (1)：104～106

126 黄勇，吴建铣．高性能结构陶瓷的现状和发展趋势．材料科学进展．1990，4 (2)：150～160

127 徐永东，张立同，张湛．陶瓷基复合材料进展．材料科学与工程．1992，(4)：18～25

128 苏波．陶瓷纤维及其陶瓷基复合材料．材料导报．1994，(2)：67～70

129 Nakamura M et al.Microstructure of Joining Interfaces of Si_3N_4 Ceramics Formed by Diffusion Joining.Journal of Materials Science Letters.1997.16 (20)：1654～1655

130 Nakamura M et al.Diffusion Joining of Si_3N_4 Ceramics by Hot Pressing under High Nitrogen Gas Pressure.Journal of Materials Science Letters.1997，16 (12)：1030～1032

131 Salvo M et al.Joining of CMCs for Thermonuclear Fusion Applications.Journal of Nuclear Materials.1996，1 (233～237)：947～953

132 Singh M.Ceramic Joining Technology.Advanced Materials & Processes.1998，154 (4)：89～90

133 Singh M.A Reaction Forming Method for Joining of Silicon Carbide-Based Ceramics.Scripta Materialia.1997，37 (8)：1151～1154

134 Singh M et al.Joining of Silicon Carbide-Based Ceramics by Reaction Forming Approach.Ceramic Engineering and Science Proceedings.1997，18 (3A)：161～166

135 Colombo P et al.Joining of Reaction-Bonded Silicon Carbide Using a Preceramic Polymer.Journal of Materials Science.1998，33 (9)：2405～2412

136 Torrecillas R et al.Alumina-Alumina and Mullite-Mullite Joining by Reaction Sintering Process.Scripta Metallurgica et Materialia.1994，31 (8)：1031～1036

137 Dixon D G.Geramic Matrix Composite-Metal Brazed Joints.Journal of Materials Science.1995，30 (6)：1539～1544

138 Nakamura M et al.Joining of Carbon Fiber-Reinforced Silicon Nitride Composites with 72Ag-26Cu-2Ti Filler Metal.Journal of Materials Science.1996，31：4629～4634

139 Nakamura M et al.Joining of Si-Ti-C-O Fiber-Assembled Ceramic Composites with 72Ag-26Cu-2Ti Filler Metal.Journal of Materials Science.1996，31：6099～6104

140 Lee Ki-Yong et al.Microwave Joining and Repair of Ceramics and Ceramic Composites.Ceramic Engineering and Science Proceedings.1997，18 (4)：545～550

141 Sherwood W J et al.Joining Ceramic Composites Using Active



Metal/HPCS Preceramic Polymer Slurries. Ceramic Engineering and Science Proceedings. 1997, 18 (3A): 177～184

142 任家烈，吴爱萍．先进材料的连接．北京：机械工业出版社，2000

143 何鹏．TiAl 与 40Cr 钢复合阻隔法扩散连接机理及工艺研究．[博士学位论文]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2001

144 刘会杰．SiC 陶瓷与 TiAl 合金的扩散连接机理及反应层成长行为研究．[博士学位论文]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2002

145 仲增墉，叶恒强主编．金属间化合物．北京：机械工业出版社．1992

146 S. L. Semiatin, et al.. Segregation and Homogenization of a Near－Gamma Titanium Aluminide. Metall. Trans.. 1992, 23A (1): 149

147 贺跃辉等．TiAl 基合金双温热处理原理及相变特征的研究．中南工业大学学报，1996，27 (3)：298

148 彭超群，黄伯云，贺跃辉．合金化对 TiAl 基合金性能的影响及机理．中国有色金属学报，1998，8 (增 1)：11

149 T. J. Jewett, B. Ahrens and M. Dahms. Stability of TiAl in the Ti－Al－Cr System. Materials Science and Engineering. 1997, A225: 29～37

150 瀬户佐智生，松本 浩司．TiAl 金属间化合物と构造用钢の扩散接合部の强度特性．溶接学会论文集．1998，16 (1)：59～61

151 秦川．高温用 γ－Ti Al 合金的钎焊．稀有金属与硬质合金，2003，31 (2)：52

152 日本熔接学会．熔接·接合便览．东京：丸善出版社，1994

153 American Welding Society. Welding Handbook: Vol. 13. 8th Miami, 1996

154 美国金属学会主编．金属手册：第九版，第 6 卷．北京：机械工业出版社，1994

155 重政裕之，宇都官真．人工卫星における复合材料．材料科学．1998，35 (5)：231～136

156 板本昭．复合材料开发の最近の动向——航空．宇宙关联．材料科学．1998，35 (5)：244～250

157 山口泰弘，吉田擀根．航空宇宙运ミステム用先进复合材料の新成形法．日本复合材料学会志．1999，25 (2)：45～54

158 S. V. Nair, J. K. Tien and R. C. Bates. SiC－Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites. Int Met Rev. 1995, 30 (6): 275～288

159 J. Eliosson, R. Somclstrom. Applications of Aluminium Metal matrix Comatrix Composites. Key Engineering Materials. 1995, (1): 3～36

160 M. B. D. Ellis. Joining of Aluminum Base Metal Matrix Composites. International Materials Reviews. 1996, 42 (2): 41～58

161 刘黎明．铝基复合材料非夹层液相扩散焊接机理研究：[博士论文]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2000

162 赵永春．颗粒增强铝基复合材料的显微组织及力学性能：[博士论文]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，1997

163 I. V. Zvolinskll, V. S. kuchuk. Special Features of Brazewelding Metal Matrix Composites. Welding International. 1995, 9 (1): 41～43

164 马森林．超细颗粒增强铝基复合材料的微观结构与拉伸行为 [博士论文]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，1999

165 L. Salvo, G. L. Esperance. M. Suery, J. G. Legoux. Interfacial Reactions and Age Hardening in Al－Mg－Si Metal Matrix Composites Reinforced with SiC Particles. Mater Sci Eng. 1994, (4): 173～183

166 刘黎明，祝美丽，徐卫平，牛济泰．铝基复合材料 SiCw/6061Al 的激光焊接．焊接学报，2001，22 (4)：13～16

167 程兆瑞，李铮国．塑料粘接技术手册．北京：中国轻工业出版社，1992

168 沈惠玲，高留意．超声波焊接及接口设计指南．天津轻工业学院学报，1999 (4):31～34

169 周兴建．经济有效的塑料焊接工艺．国外塑料，1996 (2):39～41,22

170 张胜玉．塑料振动焊．汽车工艺与材料，2001 (3)：4～6

171 张胜玉．塑料激光焊接．国外塑料，2000，18 (2)：27～28，32

172 Mrill. M. Apter, Tony Hoult，何萍 译．半导体激光器在塑料焊接中的应用．电子产品世界，2000 (11)：28～29

173 印明恒．塑料焊接加工．电子工艺技术，1995 (6)：39～45

174 机械工业部．焊接材料产品样本．北京：机械工业出版社，1997

175 Sumikin Welding Industries Ltd《Sumitomo' s Welding Materials And Equipments》

176 Oerlikon Ltd《Handbook Welding Consumables》，1996

177 尹士科等．世界焊接材料手册．北京：中国标准出版社，1995

178 董祖珏等．卷取机助卷辊、夹送辊高韧性耐热耐磨合金堆焊技术研究．宝钢 2050 毫米带钢热连轧机装备研制技术．第五分册．1991

179 董祖珏等．新型无钴阀门密封面堆焊材料－NDG－2 镍基硬质合金的研制．第六届全国焊接学术会议论文选集，1990

180 American Welding Society: Welding Handbook, 3A, sixth edition, Miami, 1996

181 董祖珏等．国内外堆焊发展现状．第八次全国焊接会议论文集，1997，(1)：157～164


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET



第5篇

焊接生产过程自动化

主编 蒋力培

编写 蒋力培 陈强 孙振国
宋永伦 焦向东 王中辉

审稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会





从工程实际来说，焊接生产过程自动化是包括从备料、切割、组对、焊接到检验等一系列工序的焊接产品生产全过程的自动化。但从焊接技术角度来看，其中核心的工序是焊接自动化。鉴于目前大部分焊件是采用电弧焊方法生产的，本篇只介绍电弧焊自动化技术与装备的相关知识，包括焊接自动化的现状与发展、焊接过程信息检测处理与质量自动控制、焊接自动化设备设计以及焊接机器人应用等内容。

第1章　焊接生产自动化现状与发展

焊接生产自动化技术是先进制造技术的重要组成部分，随着电子技术、计算机技术、数控技术及机器人技术的发展，近20年来自动焊接技术及装备方面已取得突飞猛进的发展与提高，在我国也涌现出一批相当先进的焊接设备制造厂及持续研制开发焊接自动化新技术新产品的科研单位，这就为大规模发展应用焊接自动化技术提供了坚实的基础。本章以下各节就焊接自动化的发展特点、装备分类、典型产品、发展方向与关键技术等具体问题进行分析介绍。

1　现代焊接自动化技术与装备的主要特点与我国发展概况

当代国内外焊接自动化技术总的发展特点是数控化、专用化与智能化，这也是与金属切削加工等其他机械制造工业的现代化步伐一致的。

1）现代焊接自动化技术与装备的主要特点可归纳为以下几点。

① 数控化　目前在焊接装备控制系统中，采用PLC可编程控制器已成为最普通的控制器件，为提高焊接装备自动控制的功能和精度已开始采用基于PC机的自动控制系统和直接数字控制系统，实施焊接设备数字化控制，不仅提高了效率，确保了焊接质量，改善了操作环境，也为焊接装备的网络化控制提供了基础。

② 智能化　焊接装备的智能化控制是焊接过程自动控制的高级形式，通过各种专用的计算机软件可按工件和焊接参数对焊接工艺参数进行优化选择；自动编制焊接程序，以实现焊接过程的全自动化。

③ 多功能化　为充分发挥自动化焊接设备的利用率，一台焊接装备按工艺要求可装备各种焊头，如单丝和多丝埋弧焊，单丝或双丝窄间隙埋弧焊头MIG/MAG焊头和带极堆焊头等，也可与滚轮架、变位器或翻转机配套以完成筒体内外纵环缝、封头拼接缝、内缝堆焊、大直径接管环缝焊接等。

④ 精密化　精密化的内涵包括高精度、高质量和高可靠性。以焊接机器人配套的焊接变位机为例，最高的重复定位精度为±0.05 mm，机器人和精密操作机的行走机构定位精度为±0.1 mm，移动速度的控制精度为±0.1%。

⑤ 大型化　焊接装备的大型化是焊接结构向高参数、重型化和大型化发展的需要。如重型厚臂容器焊接中心的立柱横梁操作机的最大规格已达12.5 m×10 m。龙门式操作机的规格为8 m×8 m。大型造船厂使用的门架式钢板纵缝焊机最大行程为12 m。集装箱外壳整体组装焊接中心门架式操作机的工作行程达16 m。重型H型钢和箱型梁生产线占地面积可达整个车间。

2）我国在焊接自动化技术方面的发展与应用现状大体可归纳为以下几点。

① 发展与应用各种自动化焊接机、切割机　到20世纪90年代中期，我国的焊接机械化与自动化工作量占焊接工作量的比重已超过20%，而在以焊接技术为主导制造技术的大中型骨干企业中，焊接机械化与自动化程度已达到40%～45%。在汽车、锅炉、化工机械、工程机械和重型机械等国家重点骨干企业中，焊接生产机械化与自动化技术达到国际20世纪90年代初的先进水平。特别是研制、开发了电站锅炉、压力容器等焊接结构所需的专用自动焊机及数控切割机，基本上满足了国内生产的需要。

② 发展各种焊接自动化辅助装置，建立焊接生产线　多自由度转胎架、变位器、机械手等自动化辅助装置已能自制并应用于焊接生产过程。我国的汽车、摩托车、锅炉、压力容器、船舶、工程机械和重型机械等行业的大中型骨干企业，都开发了自动化程度不同的各种焊接生产线及焊接中心技术。

③ 应用计算机技术和焊接机器人，发展现代焊接自动化技术　在汽车、摩托车、锅炉、压力容器、船舶、工程机械和重型机械等企业中，发展了成套焊接装备、焊接机器人、焊接中心、焊接柔性制造系统、计算机辅助设计与制造技术及检查技术等。到20世纪90年代中期，国内使用焊接机器人的企业约70家，焊接机器人共500余台，分布在汽车（占65%）、摩托车（占15%）、工程机械（占16%）及其他（占4%）行业。我国已建成5条焊接柔性制造系统FMS，焊接机器人技术达到国际70年代末到90年代初的水平。

④ 国内焊机行业实现了更新换代　近十年来我国电焊机行业的民营与合资企业发展速度很快，一批新兴焊接设备制造企业已经崛起。据统计，我国年产量2 000万元以上的焊机厂已经有10多家。其中许多企业还具有很强的设计开发成套焊接自动化装备的能力，如成都焊研威达自动焊接设备有限公司、哈尔滨威得焊接自动化系统工程有限公司、南京奥特电气有限公司、上海恒通电焊机有限公司、无锡阳通机械设备有限公司等，其主要产品与情况见表5.1-1。

表5.1-1　部分国内外焊接自动化设备制造厂商主要产品与情况一览表

厂　名	主要产品（自动焊专机、成套设备）	地　址	电　话	网址或E-mail
成都焊研威达自动焊接设备有限公司	H型钢箱形梁自动焊生产线，轧辊堆焊机，焊接操作机、变位机，各种自动焊专机，窄间隙埋弧焊机，多路焊机头，埋弧自动焊车，数控多头切割机，带极堆焊机，螺旋焊管机	成都市二环路东一段29号 邮编：610051	Tel：028－83289333 83287333 83282333 Fax：028－83280333	sales@topweld.com
哈尔滨威得焊接自动化系统工程有限公司	焊接机器人工作站、焊接自动化生产线，各种自动焊专机、数控切割设备、激光跟踪系统、接触式两维跟踪系统，双丝管间隙埋弧焊机、翅片管自动焊机	哈尔滨市和兴路111号 邮编：150080	Tel：0451－6334898 Fax：0451－6335215	Autoweld@public1.ptt.js.cn



续表 5.1-1

厂 名	主要产品（自动焊专机、成套设备）	地 址	电 话	网址或 E-mail
南京奥特电气有限公司	储油罐自动焊系统，船舶平面组件龙门自动焊系统，船厂拼板双面龙门焊接系统，H型钢与箱型梁/柱生产线，工艺管道工厂化预制生产线，压力容器/管道专用自动焊系统	南京市江苏路60号世贸中心大厦B座1902室 邮编：210009	Tel：025－3305843 Fax：025－3305852	gcs@0451.com
上海恒通电焊机有限公司	自动角焊机、H型钢双头自动埋弧焊机、填充丝自动TIG焊机、各种自动 CO_2/MAG/埋弧焊设备，程控气保护焊/埋弧焊摆动器	上海浦东新区青墩镇 邮编：201201	Tel：021－68906660 68680069 Fax：021－68885069	
无锡阳通机械设备有限公司	焊接操作机、变位机，H型钢自动焊接生产线，箱型梁自动焊接生产线，数控切割机，各种焊接专机，机器人焊接工作站	江苏省无锡市惠山区阳山镇 邮编：214155	Tel：0510－3691884 3691941 Fax：0510－3691881	http：//www.yangtong.com.cn yangtong@public.wx.js.cn
华恒电气工业有限公司	全位置自动焊机，自动管/板焊机，全自动微束TIG/Plasma设备，轧辊热丝堆焊机，全自动TIG/Plasma焊机，激光焊机，数控切割机	上海市虹漕南路718号2栋28楼 邮编：200233	Tel：021－64751066 Fax：021－64751067	
首钢莫托曼机器人有限公司	系列机器人，弧焊与点焊焊接机器人（引进日本安川工业机器人）	北京经济技术开发区永昌北路7号 邮编：100176	Tel：010－67880544 Fax：010－67882878	http：//www.sg－motoman.com.cn
唐山松下产业机器人有限公司	焊接机器人、系列逆变焊机（TIG焊机、脉冲TIG焊机，CO_2/MAG焊机）	河北省唐山市高新技术开发区 邮编：063020	Tel：0315－3206060 3206066 Fax：0315－3206070	http：//www.tsmi.com.cn sales@tsmi.com.cn
美国林肯电气公司 The Lincoln Electric Company	焊接机器人系列、机器人激光跟踪系统MIG－TRAK，各种自动焊专机，双丝焊机，窄间隙自动焊专机，立向上焊机，NA系列自动焊头，各种弧焊电源	22801 St. Clair Avenue Cleveland，Ohio 44117－1199 U.S.A.	Tel：216－481－8100 Fax：216－486－1363	
瑞典伊萨有限公司 ESAB Co.	A21系列管对管全自动TIG焊机，A22系列管对极全自动TIG焊机	瑞典地址：ESAB AB Box 8004 402 77 Goteborg Sweden 中国区一级代理：成都焊研		
日本欧地希公司 OTC Co.	焊接机器人，CO_2、TIG、MIG系列焊机，各种自动焊专机，系列化自动焊头，自动埋弧焊机	日本国大阪府摄津市南千里丘5—1	Tel：06－6317－2506 Fax：06－6317－2583	otc@pop16.atn.ne.jp

另外，国内焊接装备配套器具的生产已形成一定的规模，产品质量已接近国际水平。据最近统计，生产送丝机，各种焊枪、导电嘴、减压器、流量计、工夹具、焊条、焊剂烘干设备、陶瓷喷嘴等的专业生产企业共34家，年产值超过亿元。如广州阿比泰克焊接技术有限公司已与国内多家焊枪配套厂家组成集团公司，2001年焊枪总产量已达9 000万元。

2 焊接自动化弧焊设备分类

焊接自动化弧焊设备按照功能可分为通用型自动弧焊机、专用型自动弧焊设备与焊接机器人三大类。其中，通用型自动弧焊机大都是小车型自动焊机，如埋弧自动焊车、CO_2 自动焊车等等，这类焊机自动化程度不高，实际上是半自动焊设备。

专用型自动弧焊设备俗称自动焊专机，是提高焊接生产率、保证产品焊接质量的有效手段，已广泛应用在锅炉、压力容器、船舶、汽车、重型机械和金属结构制造的批量生产中，并正向精密化、大型化和现代化方向发展。自动焊专机所使用的焊接方法主要有埋弧焊、CO_2 焊、MIG焊与MAG焊，还有TIG焊、热丝TIG焊、等离子弧焊、激光焊以及各种高效堆焊方法。用于薄板、超薄板和精密部件焊接的自动焊专机，其制造精度和机头进行走精度已提高到±0.1 mm。下面就主要介绍专用型自动弧焊设备的情况。

2.1 专用型自动弧焊设备

近年来，各种专用型自动弧焊设备发展迅速，并逐渐趋于通用化和标准化。目前已基本形成以下几类专用型自动弧焊设备：薄板纵缝自动焊机；环缝自动焊机；型钢自动焊机；管道对接自动焊机；批量生产专用自动焊机。

（1）薄板纵缝自动焊机

薄板纵缝自动焊机可分为薄板拼缝自动焊机、筒体外纵缝自动焊机和筒体内纵缝自动焊机三种。所选用的焊接方法取决于板厚和材料种类，0.5～3 mm不锈钢薄板通常选用钨极氩弧焊；0.3～1 mm不锈钢薄板应选用微束等离子弧焊；3～10 mm薄板纵缝应选用实心焊丝或药芯焊丝熔化极气体保护焊；12 mm以上通常采用埋弧焊；3 mm以上的铝合金薄板最好采用脉冲电弧熔化极气体保护焊。

为实现薄板纵缝单面焊双面成形焊接工艺，要求采用压



紧机构将待焊接缝均匀压在铜制的衬垫上。焊接不锈钢和钛合金时应在铜衬垫凹槽内钻制均布的小孔，以便背面通保护气体，保证背面焊道表面不被氧化。

标准型薄板纵缝自动焊机的控制系统均为开环控制，只保证焊头均匀等速运动，不能按接缝的实际装配间隙调整焊接电流和焊接速度。因此，为保证单面焊双面成形的焊接质量，接缝的装配间隙应严格控制在 0～0.5 mm 范围内。

(2) 环缝自动焊机

直径在 1.0 m 以上的压力容器、锅炉筒体和大直径管道的环缝可以采用立柱横梁焊接操作机和相应的滚轮架或头尾架翻转机组合的焊接中心来完成自动焊。直径 300～1 000 mm 的气罐、储罐、气缸、空心球、管道法兰和车轮组件则利用车床式小型环缝自动焊机。按所焊工作的壁厚和质量要求，可以采用钨极氩弧焊、熔化极气体保护焊、等离子弧焊和埋弧焊。

车床式小型环缝自动焊机是由小型头尾架翻转机、机架、焊头及十字滑架调整机构、焊枪、焊接电源和控制系统等组成。为提高生产效率，可在同一个机架上安装两个焊头，同时焊接两条环缝，如液化气罐两端的封头环缝。头尾架的夹紧装置可以采用气动元件，以缩短装卡工件的辅助时间。

对于管接头、轴套、法兰盘组件和齿轮组件等工件可以采用类似于立式台钻的小型环缝自动焊机。其由立柱或机架、旋转机头、定位芯轴、焊枪、送丝机构、焊接电源和控制系统等组成，焊枪位置按工件直径调整，焊枪的倾角应适应不同的角焊缝焊接工艺。当焊缝轨迹为空间曲线的接管焊缝时，最简单的方法是采用靠模实现仿型焊接。这类小型环缝自动焊机最关键的技术之一是要解决环缝焊接的导电和输气问题，以避免电缆和气管的缠绕。为简化焊机的结构，也可以采用焊头固定，工件旋转的技术方案，允许连续进行多层多道焊接。为进一步提高焊接效率，可以采用双焊枪，转胎只需将工件旋转 180°。

大直径接管与圆筒体相交的接缝及等径焊接三通相贯线接缝是一种马鞍形曲线，即所谓三维曲线。焊接过程中焊头做 *xyz* 三个方向的运动，或者借助翻转机使工件的旋转运动与焊枪的移动协调动作。焊接这种空间曲线焊缝时，操作者必须连续监视并调整焊头的运动，要求焊工有较高的操作技术和实际经验。随着计算机控制技术日趋成熟和工程应用，接管焊机焊头运动的计算机数字控制已得到基本解决，并已在实际生产中应用。

(3) 型钢自动焊机

近年来，我国钢结构生产成倍增长，而钢铁工业远不能满足各种规格型钢的需求，特别是用于钢结构建筑的 H 型钢。实践证明，采用焊接方法将板条组焊成 H 型钢材是最经济的生产方式，受到工程界的高度重视。各种型钢自动焊机的开发研制发展迅速。H 型钢自动焊机可将翼板和腹板通过 4 条角焊缝焊成 H 型钢。该自动焊机由立柱式或龙门式焊接操作机、工作平台和压紧机构、焊头及调整机构、焊枪、焊接电源、送丝机构、翻转装置和控制系统等组成，可同时焊接翼板与腹板之间的两条角焊缝。型钢自动焊机通常配用埋弧焊。对于薄壁工字型钢可采用 MAG 焊，以减少焊接变形。立柱式或龙门式操作机及焊头调整机构具有较宽的调节范围，以适应不同规格 I 型钢的产生。目前，最大的工字型钢自动焊机可焊接最大长度为 20 m，最大宽度为 1.2 m 的型钢。

(4) 管道对接自动焊机

当今，在钢铁工业中约有 10% 的钢材是各种规格的管子和管材，不锈钢管的产量也在不断增长。在石油、化工、饮料、食品、航空等部门工业管道铺设的工作量巨大，管路和管道的焊接迫切需要采用自动焊。

管道自动焊机按管径和壁厚的不同而有不同的结构形式。以天然气管道自动焊机为例，有管外焊机与管内焊机两类。管外焊机国外产品有意大利的 PWT 专机，美国 CRC 公司的 P 系列与 M 系列专机，可用于各种壁厚与管径的天然气管道现场对口焊接。近年来廊坊管道局、科学研究院等单位开发的全位置管道焊机已批量生产用于西气东输天然气管道工程。天津焊接研究所生产的一种小直径薄壁管对接的全位置焊管机采用封闭式焊头，采用脉冲钨极氩弧焊时，可焊最大壁厚为 3 mm，焊接电流范围为 5～300 A；管壁厚 3 mm 以上时，采用填丝 TIG 全位置焊，对接管端边缘需开 V 形坡口。

(5) 批量生产专用自动焊设备

这是专门为某一客户设计的专用于焊接特殊形状工件和大批量生产的焊接专用设备。其特点是效率较高，工件无需先装配和定位点焊，而是采用相应的夹具将工件定位、转置到合适的焊接位置。这类焊机由于用途单一，结构简单，借助专用夹具可以使焊机的操作系数达到 100%，容易实现低成本自动化。

这类专机的焊接自动化程度可分为两大类，一类是装料和卸料由操作者完成，焊接过程要求操作者监视，另一类是操作者只管装料和卸料，无需监视焊接过程而自动完成。

2.2　焊接机器人

焊接机器人在焊接自动化中占有重要的位置。我国焊接机器人的应用起步较晚，主要用于汽车、工程机械和摩托车行业。引进国外的产品主要有 ABB，IGM 和安川莫托曼等焊接机器人。国产机器人产品还较少，目前首钢与日本安川株式会社合资兴建的首钢莫托曼机器人有限公司已能批量生产。

焊接机器人的应用以工作站为单元，其外围设备包括变位机、输送装置以及机器人用焊接电源等都是发挥机器人功效的关键技术。机器人工作站采用模块化技术的开放式控制系统，可按用户要求同步控制机器人和外围设备，扩大了机器人的工作范围，以适应像汽车车身焊装线这种使用上百台机器人和大量系统装置的大型复杂工程。目前开发的 32 位计算机控制系统，可同步控制 12～16 轴的运动，利用 Windows 为开发平台的控制软件，可使操作和编程简单化。

总之，近年来，我国焊接自动化专机开发有了长足的进步，专用设备的品种规格及自动化水平都有了很大提高，但在技术集成和模块化产品技术等方面尚需发展提高。

3　典型产品的自动化焊接技术

目前国内外在管道、大型储罐、船舶等焊接产品方面的自动焊技术已比较成熟，并得到了广泛的应用，下面对其实际应用的设备与工艺情况作一简要介绍，以供借鉴。

3.1　天然气管道的自动化焊接技术

天然气管道的特点是长距离、大口径、厚壁、高压、高耐蚀性，其焊接施工要求严格，为保证管道建设的高效率和高质量，在国内管道焊接施工过程中已开始推广使用管道自动焊技术。目前用于现场比较成熟的自动焊技术主要有实芯焊丝气体保护自动焊接管道技术与药芯焊丝自动焊接管道技术。

(1) 实芯焊丝气体保护自动焊接管道技术

这种方法使用的设备目前有美国 CRC 公司生产的 P (Pipeline) 系列和 M (Multiple) 系列自动焊机。其中 P 系列是管道专用焊机，已开发出 P100、P200、P500 等几种焊机，适用于 9 mm 以下薄壁管的全位置焊接，P100 焊机工作时需要热焊、填充、盖面各一套焊机，而 P200 则可由一套焊机完成整个工作，见图 5.1-1。



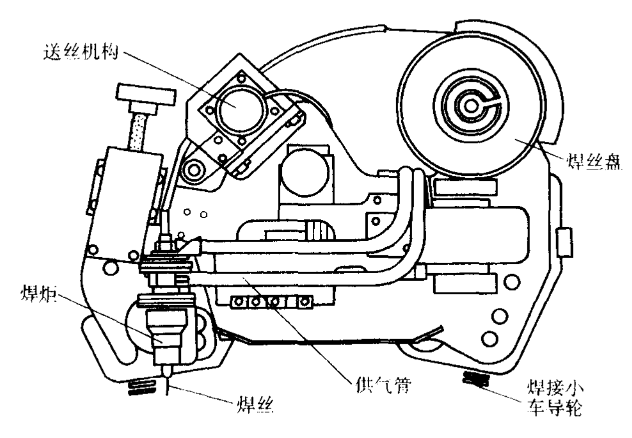


图 5.1-1 P200 自动焊机

P500 焊机较 P200 焊机速度快 40%，但设备费用较高。以上焊机均不能直接用于根焊焊接。M 系列焊机适用于任意壁厚，适合我国国情的有 M200、M300 等焊机。以上焊接均采用复合坡口，见图 5.1-2。图 5.1-2 中，左面为复合坡口，右面为用手工电弧焊和半自动焊焊接时的坡口。

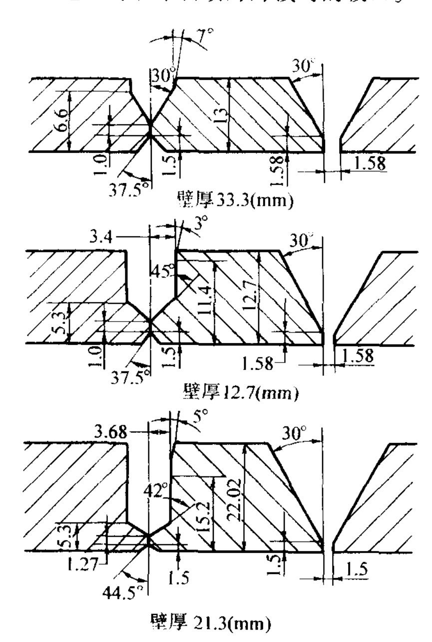


图 5.1-2 自动焊的复合坡口与 API 标准坡口比较

根焊是管道自动焊技术中的重要问题。按根焊部方式的不同，管道自动焊机又分为管内焊机与管外焊机两种。

管内焊机与内对口器装在一起，直接从焊缝背面施焊，只能用于管径大于 1 016 mm 的大口径管的焊接，如美国 CRC 公司的自动焊机系统。

管外焊机又可分为两类，一类管外焊机需在内对口器上加一圈铜制垫板，在坡口内表面起支撑及散热作用，但需严格控制焊接参数，使垫板处于 CO_2 保护环境中，以防与焊缝黏结，如法国 SATURNE 系统、意大利 PASSO 系统、美国 H.C.KRICE 公司的自动焊机等。另一类管外焊机采用脉冲电源，利用脉冲电源能对热输入及焊缝成形进行精确控制的特点，在焊缝背面不加铜垫板的情况下实现根焊部位的焊接。上述焊机的操作是在控制台上完成的，焊机需要控制的参数有：焊接电压、送丝速度、焊枪移动速度、焊枪摆动频率、摆动宽度及摆动延迟时间等，根焊、热焊时焊头一般不摆动，而填充、盖面焊时焊头是摆动的。该类设备已在阿意输气管线、科洛尼尔成品油管线、荷兰北海天然气管线等工程中实际应用，效果良好。到 1990 年止，仅利用 CRC 自动焊接技术焊接的管道累计长度就已达 2.4×10^4 km。

(2) 药芯焊丝自动焊接管道技术

药芯焊丝自动焊可分药芯焊丝自保护焊和药芯焊丝气保护焊两种。

药芯焊丝与实芯焊丝比较有如下优点：熔敷速度快，焊接质量好，特别是冲击韧性好，经济性好，对各种管材的适应性好、其药粉成分可以方便地加以调整等。

药芯焊丝自动焊设备主要由焊接电源、送丝系统、焊枪行走系统、供气系统及控制系统等组成，有代表性的设备是前苏联的‘对接 1’和‘对接 2’两种型号。该设备在进行非旋转管接头焊接时，首先用带有铜垫板的内对口器将加工好坡口的管子进行组对，再安装自动装置，进行上向焊，药芯焊丝向钢管边缘、铜垫板和移动的铜滑板所形成的间隙内给送，两台焊机同时焊 6→0 点和 6→12 点。若壁厚达到 10～20.5 mm，因仰焊位一次焊接达不到所需高度，需进行 2～3 层焊接，其焊接速度很快，如：1 420 mm × 16 mm 钢管，一个焊接接头的完成约需 65 min，而半自动焊需 120 min。前苏联药芯焊丝的研制起步较早，相关自动焊设备也比较先进，他们采用这一技术焊接的管线达数千公里。

(3) 意大利 PWT－CWS.02NRT 管道焊接专机的应用

中国石油天然气管道局针对西气东输管道工程从意大利引进了管道自动焊专机 PWT－CWS.02NRT。该设备不仅能完成一般的自动焊工作，还突出地解决了不用背面衬垫的单面焊双面成形自动根焊问题，根焊厚度达 3.5～4.0 mm，焊接质量高，焊接速度较快。

PWT－CWS.02NRT 是 PWT 新根焊技术的第二代产品，采用计算机编程对 0°～180°焊接位置进行程序控制，每 15°为一组焊接参数。焊接过程中控制的焊接参数多达 6 个，包括焊接速度、送丝速度、摆动幅度、摆动速度、边缘停留时间、电弧电压等，使得焊接过程中沿圆周变化需要的调节、干预较少，保证了每一道焊缝都具有相同的焊接工艺。

根焊时采用内对口器无间隙组对（0～0.5 mm），双机头各自独立地从外部单面焊双面成形。焊接操作可以通过控制焊接小车来完成，也可以不接触焊接小车只通过控制遥控盒来完成。

在管径不小于 508 mm 的管道上均可采用 PWT－CWS.02NRT 焊接专机进行焊接施工。焊接施工前，需要根据工程要求、管径、壁厚、管材等基本情况进行焊接工艺试验，测试、检验并优化焊接参数。

虽然 PWT－CWS.02NRT 焊接专机具有上述优点，但其结构较复杂，维修困难。

PWT－CWS.02NRT 焊接专机的系统组成如图 5.1-3 所示。

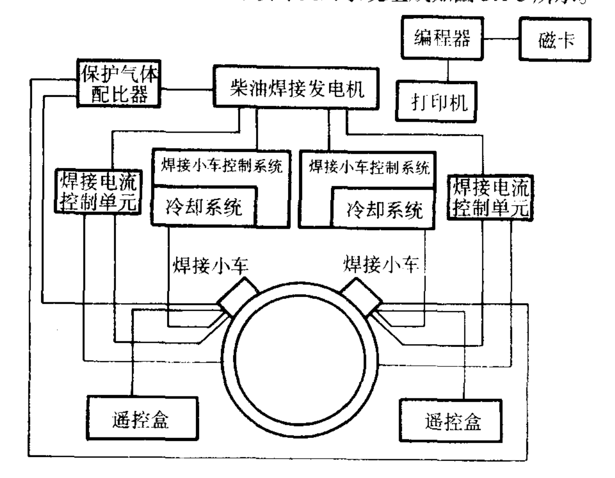


图 5.1-3 PWT－CWS.02NRT 焊接专机的系统组成



柴油焊接发电机（GEN－APW 2×400）驱动焊接电源，并为整个系统提供电力。焊接电流控制单元（WCC）将柴油焊接发电机的电流转换输出为焊接需要的电流，它是该焊接专机的技术要点。焊接小车控制单元（HCU 300－NRT）主要根据预先编制的程序控制焊接小车执行焊接操作，是本焊接系统的核心部分，它可对局部的焊接参数进行修改，但这种修改不能保存到磁卡中。冷却系统（SAC HCU）用于控制焊接小车控制单元的温度和湿度。保护气体配比器（GMU）用于提供焊接时需要的保护气体类型、配比比例和流量。焊接小车（WHU－NRT）可接受焊接小车控制单元发出的指令完成焊接操作，其焊枪采用水冷却法来确保在大电流下的连续、安全焊接。编程器（WPG）用于设定和修改焊接参数。编制完成的焊接参数存储在磁卡（CAR）中，并通过磁卡加载到焊接小车控制单元。编制完成的焊接参数可通过打印机（PRT）打印输出。

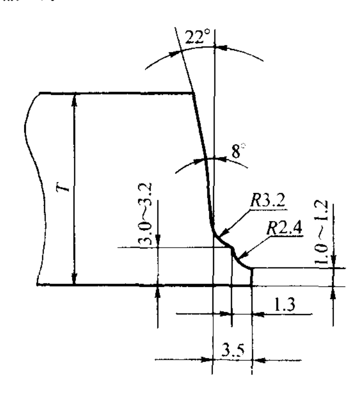


图 5.1-4　PWT 焊接坡口形式

采用 PWT－CWS.02NRT 焊接专机进行根焊，焊接坡口形式如图 5.1-4 所示。这种焊接坡口的关键尺寸为钝边和底部圆弧的大小，关键尺寸的加工精度将直接影响根部焊透和边缘熔合的情况。当钢管壁厚发生变化时，只是 22°斜边的高度发生变化。一般情况下，钝边尺寸的范围为 1.0～1.2 mm，但对于不同牌号的焊接材料，需要通过焊接工艺试验来具体确定。底部圆弧的尺寸为高 2 mm，宽 1.3 mm。

采用 PWT－CWS.02NRT 焊接专机进行根焊，焊接工艺参数见表 5.1-2。

表 5.1-2　PWT－CWS.02NRT 焊接专机根焊焊接工艺参数

焊层	根焊	焊接速度/cm·min^{-1}	25～55
焊丝牌号	锦泰 JM 58	送丝速度/cm·min^{-1}	2.5～5.0
焊丝标准号	ER 70S－G	摆幅/mm	0～1.0
焊丝直径/mm	1.2	摆动速度/cm·min^{-1}	300～320
预热温度/℃	≥100	边缘停留时间/s	0～32
极性	焊丝接正	电弧电压/V	14～18
伸出长/mm	9～14	保护气体配比	$\varphi(CO_2)$(30%～45%)＋φ(Ar)(70%～55%)
每层焊工数	2 名	保护气体流量/L·min^{-1}	20～30

PWT－CWS.02NRT 焊接专机在使用过程中应注意以下几点。

该自动焊设备对于管口组对要求比较严格，应使用管端坡口整形机进行坡口加工，并保证加工精度，才能保证焊接质量。

工程应用前应针对工程要求、焊材、管材、壁厚等基本条件进行大量的焊接工艺试验，设计出满意的焊接接头形式，调整出适用的焊接工艺参数，以保证管线施工的焊接质量。

该设备虽然自动化程度较高，但操作人员的经验也直接影响着焊接质量的好坏。例如，当管口组对的错边和间隙在允许范围的上限时，若操作人员缺乏经验就会在这些位置出现焊接质量问题。

在焊接螺旋焊缝钢管时，由于管端螺旋焊缝附近 150～200 mm 的范围内因撅嘴而易出现坡口加工尺寸误差，从而影响焊接质量，所以一般管端螺旋焊缝应处于立缝以上的位置。

3.2　储罐自动化焊接技术

大型立式储罐是在现场组焊的，焊接工作量大，尤其是 5×10^4 m^3 以上储罐焊接量更大，见表 5.1-3。

表 5.1-3　5×10^4、10×10^4 m^3 储罐主要焊缝

容积与相关参数	焊接部位	接头形式	焊缝总长/m	焊道总长/m	可采用的自动焊
50 000 m^3 直径 ϕ＝60 m 高 h＝19 m 壁厚 δ＝10～32 mm 950 t	壁板内外立缝	对接	540	3 240（6 道）	气电或气保
	壁板内外横缝	对接	1 318	7 868（6 道）	横缝埋弧焊
	壁板＋环板角缝	T 型角接	188	1 504（8 道）	埋弧焊
	底板	对接/搭接	6 576	131 502(2 道)	埋弧焊
	加强圈	对接	1 318	2 636（2 道）	埋弧焊
	合计		9 940	28 398	
100 000 m^3 直径 ϕ＝80 m 高 h＝22 m 壁厚 δ＝10～32 mm 1 100 t	壁板内外立缝	对接	436	2 614（6 道）	气电或气保
	壁板内外横缝	对接	2 001.6	12 010（6 道）	埋弧焊
	壁板＋环板角缝	T 型角接	2 501.2	2 001.6(8 道)	埋弧焊
	底板	对接/搭接	1 500	3 000（2 道）	埋弧焊
	加强圈	对接	2 501.2	5 002.4(2 道)	埋弧焊
	合计		8 940	24 627.4	

储罐是在现场组装焊接的大型容器，在低温储罐的焊接中，采用自动焊有利于保证热影响区低温冲击性能的稳定。埋弧自动焊工艺成熟，操作简单，焊接质量稳定，在大型储罐建造中已发挥重要作用。药芯焊丝的气体保护焊是大型储罐建造的发展方向。

推广应用自动焊必须适应储罐的结构特点和施工要求。在储罐焊接中可以采用自动焊的焊接部位有如下几种。

1）底板对接焊缝、底板与环形板对接焊缝、壁板与底板 T 型角焊缝。这些焊接部位大都处于平焊和平角焊状态，有利于应用埋弧自动焊进行焊接。焊接效率高、焊缝成形好、焊后甚至无需打磨。

2）壁板立缝对接焊缝，因立缝无法敷设焊剂，不能采用埋弧自动焊；多采用高效率专用的立缝气－电自动焊或药芯焊丝 CO_2 气体保护自动焊。

3）壁板横缝对接焊缝，可采用高效率的储罐横缝专用埋弧自动焊；薄壁小容积储罐可采用药芯焊丝 CO_2 气体保护自动焊。

4）其他部位，如加强圈、拱顶、内浮盘也可采用埋弧焊或 CO_2 气体保护自动焊、CO_2 气体保护半自动焊等。

国内目前已形成储罐正装、倒装施工两种工艺，尤其是 5×10^4 m^3 以下的储罐大都采用各种形式的倒装工艺施工。

（1）储罐自动焊机简介

见表 5.1-4，目前国内使用的储罐自动焊机分为立缝自动焊专机与横缝自动焊专机两类。

表 5.1-4　目前国内使用的储罐自动焊机产品

类型	型号	制造商	配套电源	配套机头、送丝机	备注
立缝自动焊机	VEGA－VB－AC	日本新日铁	林肯 DC－600		ϕ1.6 药芯
	SEGARC－SAT	日本电友	SA－800		ϕ1.6 药芯
	AVW－800S	日本神钢	林肯 DC－1000		ϕ1.6 药芯
	VUP－NA3－ST	美国 RANSOME	林肯 DC－1000	林肯 NA－3S	自保护药芯焊丝
	AUTO VUP	南京奥特焊切	米勒 DW852	米勒 S－60	ϕ1.6 药芯
	LFX－Ⅰ（Ⅲ）	廊坊石油管道局特种机具研究所	林肯 DC－600	林肯 LN－9	ϕ1.6 药芯
	MDS 全位置气保焊机	美国 BUG－O	林肯 DC－600	林肯 LN－9	ϕ1.6 药芯
	GULLCO 全位置气保焊机	加拿大 GULLCO	DC－650	米勒 S－64	ϕ1.6 药芯
	D－AVM	天津中油工程技术研究院	NBC－450 国产	国产	ϕ1.6 药芯
横缝自动焊机	MISA－HB－A4	日本新日铁	林肯 DC－1000	林肯 NA－3S	ϕ2～4 正装
	SH－1	日本电友	SA－1000	林肯 NA－3S	ϕ2～4 正装
	AHW－800D	日本神钢	林肯 DC－1000	林肯 NA－3S	ϕ2～4 正装
	AGW－Ⅰ	美国 RANSOME	林肯 DC－600	林肯 NA－3S	ϕ2～4 正装
	SAHW－Ⅰ	南京奥特焊切	林肯 DC－600 或米勒 DM812	林肯 NA－3S	ϕ2～4 正、倒装两用
	HFX－Ⅰ（Ⅲ）	廊坊石油管道局特种机具研究所	林肯 DC－600 或伊萨 630	林肯 NA－3S	ϕ2～4 正装
	D－AGW1	天津中油工程技术研究院	国产 630	国产	ϕ2 倒装

1）储罐立缝自动焊专机　储罐立缝自动焊专机有以下三种。

① 立缝气-电焊机　立缝气-电焊机主要由台架、焊枪、可摆动的焊机头、升降系统、水冷铜滑块以及冷却水循环系统、电源、送丝机和控制系统组成，见图 5.1-5。焊机头侧有水冷铜滑块，背面有水冷铜垫板，使壁板立缝组成熔焊空腔，药芯焊丝以 50～200 次/min 的摆频和一定振幅在板厚方向摆动。采用电流反馈自动上升技术，焊接速度可在0～400 mm/min 调整。由于使用 1.6 mm 细焊丝，可以获得高熔敷速度和低热量输入。通入的 CO_2 气和药芯焊丝对焊接熔池形成气-渣联合保护，水冷铜滑块和水冷铜垫板使熔池有效地散热。整套系统的台车挂在壁板上，通过行走驱动机构可以快速移到另一条立缝位置。

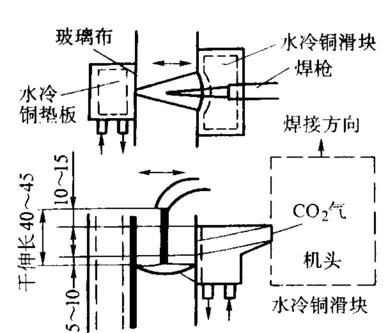


图 5.1-5　储罐立缝气-电焊机头工作示意

日本新日铁 VEGA－VB－AC、日本电友 SEGARC-SAT、日本神钢 AVW－800S 以及国内南京奥特焊切工程技术公司 AUTOVUP、廊坊石油管道局特种机具研究所仿日本新日铁的 LFX－Ⅰ（Ⅲ）立缝焊机都属于这种气－电焊机。

② 自保护药芯焊丝立缝焊机　如美国 RANSOME 公司的 VUP－NA3－ST 焊机。其系统组成和前一种立缝焊机基本相同。这种焊机在中厚板焊接时采用Ⅰ形坡口，使用自保护药芯焊丝，不需要保护气体。另外，这种焊机不是框架式台架，而是刚性重型机架。以上两种立缝焊机都是高熔敷率（是人手工焊的 20～40 倍）、高价格焊机。但是，由于气－电焊的焊枪沿立缝上升的工艺特点，不能焊到 T 字接头处，所以只能用于正装法施工；整个焊机系统质量大（美国 RANSOME 公司 VUP 自动向上立机质量达 2 t）只能用于储罐厚壁板的立缝焊接。

③ 全位置 CO_2 气体保护自动焊机　此焊机主要由轨道式无级变速小车和焊枪摆动机构组成。这种焊机是全位置焊机，既能用于正装和倒装储罐的立缝焊接，也能用于横缝焊接；同时，还可以用于球罐和其他钢结构焊接。焊材可选择药芯、实芯 CO_2 气保焊丝，也可采用自保护药芯焊丝。目前，在国内使用的产品有美国 BUG－O 公司生产的 CDS（第二代产品）、MDS（第四代产品）CO_2 气体保护全位置自动焊机；还有加拿大 GULLCO 全位置自动焊机。天津中油工程技术研究院的 D－AVW 焊机是 CO_2 气体保护自动立焊机。

2）储罐横缝埋弧自动焊专机　储罐横缝埋弧焊专机有以下四种形式。

① 正装法埋弧焊专机　焊机台架吊挂在壁板上，沿壁板上边行走。由于焊机整个系统质量大，不利于在薄板上使用。这种类型有：日本新日铁 MISA－HB－A4、日本电友 SH－1、日本神钢 AHW－800D、美国 RANSOME 的 AGW－Ⅰ、廊坊石油管道局特种机具研究所 HFX－Ⅰ横缝埋弧焊机。

② 倒装法埋弧焊专机　焊机台架坐在辅助轨道上行走，可适应各种直径与壁厚储罐的横缝埋弧焊。但是，需要在现场铺设辅助地轨和轨道支架，并且要以壁板上边为准对辅助地板轨进行精确调整。这种类型有：天津中油工程技术研究院的 D－AGW 横缝埋弧自动焊机（使用 ϕ2 mm 焊丝）。

③ 正装与倒装焊两用的储罐横缝埋弧焊专机　这种焊机从结构上进行了重大改进。

a）将行走机构做成可拆装的形式。用于正装法储罐焊接时行走机构装在台架上部；用于倒装法储罐焊接时将行走机构反向装在台架下部（需要在现场铺设辅助轨道和轨道支架）。

b）埋弧焊机头、焊剂承托传送安装在可开启的支架上，支架可通过蜗杆进行上下调整。这种类型焊机有：南京奥特焊切工程技术公司 SAHW－Ⅰ横缝埋弧焊机。



④ 底板和大角缝埋弧自动焊机　底板和大角缝焊缝处于平焊和平角焊的位置，埋弧自动焊机借助于轨道即可进行底板直缝的对接埋弧焊。埋弧自动焊机增加磁性吸附滚轮就可进行壁板与环板的大角缝内外焊接。国内在用的机型有：美国林肯 LT-7、日本神钢 Substaa-S（T 双丝）、日本大阪 SW-24、日本新日铁 SM-501H（角缝用）、以及天津中油工程技术研究院的 D-AFW1 角缝底板埋弧焊机。

（2）国内储罐自动焊应用技术状况

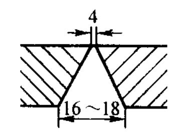
中油气、中石化系统在国内率先应用储罐自动焊，在提高焊接效率、焊接一次合格率，降低焊接成本等方面收到较好的效果。其中：立缝焊接一次合格率达 96%，横缝焊接一次合格率 94%，大角缝焊接一次合格率达 98%；焊接效率是手工焊接的 3~20 倍；自动焊占焊接总量的 58%；使用国产焊丝降低焊接成本 10%。

有关单位在使用国外焊机和进口钢板、进口焊丝，使用国外焊机和国产钢板、进口焊丝，使用国外焊机和国产钢板、国产焊丝以及使用国产焊机和国产钢板、焊材方面都进行了成功的实践。

1）储罐立缝的焊接工艺

① 储罐立缝"气-电立焊"焊接工艺要点

a）"气-电立焊"属于通过前后铜滑块和铜垫板强迫成形的气体保护熔化焊，对于板厚度小于 25 mm 采用单面 V 形坡口，板厚度大于 25 mm 采用双面 X 形坡口，见图 5.1-6。



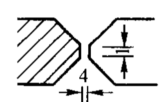


图 5.1-6　立缝坡口示意图

b）由于正面水冷铜滑块高度 240~250 mm，第一带板立缝下端 400 mm 宜采用手工电弧焊（焊条按板材和规范区配）。

c）熔池表面与铜滑块气道下沿相对位置控制在 5~10 mm。熔池过低，CO_2 气体达不到保护熔池的作用；熔池过高，容易堵塞 CO_2 气体通道。

d）焊枪嘴与铜滑块上端相对位置控制在 10~15 mm。焊丝干伸长量 40~45 mm，焊丝在板厚方向摆动幅度为板厚 δ-10 mm。焊丝在铜滑块和铜垫板间的摆动距离直接影响焊缝质量，尤其是与铜滑块间的距离，太小易出现夹渣裂缝，一般控制在 4~6 mm。另外，焊丝摆动根据不同板厚，摆动频率控制在 80~150 次/min。

② 储罐立焊参考工艺参数

a）50 000 m³ 储罐，日产 SPV50Q 钢板，日产 EG-60、ϕ1.6 CO_2 气体保护药芯焊丝，使用日本新日铁 VE GA-VB-AC 气-电立焊机（日本新日铁推荐参数见表 5.1-5）

表 5.1-5　日本新日铁推荐参数

板厚 /mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm·min⁻¹	送丝速度 /m·min⁻¹
12	340	40	12	12~13
16	380	41	14	14~15
23	430	42	13.5	17~18
28	380	40	15.5	14~15
X 形坡口	380	42	16	14~15
32	430	42	17	17~18
X 形坡口	430	43	18	17~18

b）50 000 m³ 储罐，板厚 32、30、28、25、22、20、18、14、12、10；国产 16MnR 钢板，日产 DWS-43、ϕ1.6 CO_2 气体保护药芯焊丝，使用日本电友 SEGARC-SAT 气-电立焊机（中石化三公司推荐参数见表 5.1-6）

表 5.1-6　中石化三公司推荐参数

板厚 /mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm·min⁻¹	线能量 /kJ·cm⁻¹
30	390	37	10	70
20	390	37	14.5	75
18	360	36	12	60
10	360	36	14.5	50

c）板厚 10~32 mm，美国 NR431 自保护药芯焊丝、不要气体保护，I 形坡口，使用美国 RANSOMEVUP 立缝向上自动焊机（奥特公司推荐参数见表 5.1-7）

表 5.1-7　奥特公司推荐参数

板厚 /mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm·min⁻¹	间隙 /mm
12	435~465	35~37	15	12
16	470~510	36~38	8	16
20	510~550	37~39	7	18
25	510~550	37~39	6	18
32	645~685	40~42	17	22

d）20 000 m³ 储罐，带板 10 mm，国产 16MnR 钢板，国产 PK-YJ507　CO_2 气体保护药芯焊丝，使用日本新日铁 VEGA-VB-AC 气-电立焊机。CO_2 气体工作压力为 0.3 MPa、流量 30~50 L/min、焊丝摆动幅度（板厚 t-10）mm、摆动频率 80~100 次/min。（中油气六公司推荐参数见表 5.1-8）

表 5.1-8　中油气六公司推荐参数

厚度 /mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm·min⁻¹	线能量 /kJ·cm⁻¹
24	420	42	12	88
22	410	41	12	84
20	400	40	12	80
18	390	40	13	72
15	380	38	14	62
12	360	36	16	48
10	360	36	16	48

2）储罐横向埋弧自动焊　横向埋弧自动焊的参考工艺参数见表 5.1-9。

表 5.1-9　横向埋弧自动焊参考工艺

焊缝位置	板厚 /mm	焊接层数		电流 /A	电压 /V	焊接速度 /cm·min⁻¹
横焊	16	外侧	1	460	27	40
			2	480	27	55
			3	520	29	60
			4	480	27	55
		内侧	1	540	29	50
			2	480	27	60

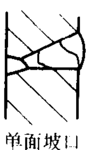


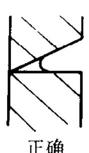
① 横缝埋弧焊工艺要点

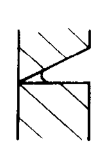
a）焊接前清理坡口间隙中的铁锈及水分。

b）焊剂在200～250℃烘烤加热1 h后在150℃保温。焊剂保护层厚度不能太厚或太薄，焊剂传送托带距焊缝下沿15 mm。控制焊剂敷设厚度，焊剂太厚时内部气体不易逸出，容易造成气孔；焊剂太薄时焊剂起不到保护作用。焊剂尽可能采用烧结焊剂。这种焊剂是球形小颗粒，保护性能好，Si含量小，减少焊缝淬硬组织，提高韧性。

c）焊接好第一道焊缝是控制横缝自动焊质量的关键，要调整焊枪和焊丝位置，使根部成形良好（见图5.1-7）。







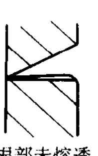


图5.1-7 横缝埋弧焊根部焊缝成形示意

d）在起弧时焊丝与坡口下沿夹角应不小于35°，焊丝端头距坡口根部应在5 mm左右（见图5.1-12）。当焊丝端头距坡口根部距离太小时，容易造成熔深过大、产生高温裂纹；当距离太大时，根部熔合不良，易产生夹渣。

e）调整焊丝后不可将机头回调，应将焊丝缩回，保证焊丝在正式焊接时回到预调好的位置。

f）在使用倒装储罐横缝自动焊时，要正确使用引导针或聚光器光斑瞄导跟踪调整（见图5.1-8）。在施焊的横缝上带板的上面，划出与下带板平行的标志线，并以此线找平辅助地轨。在焊接中不断观察，当引导针或瞄导光斑偏离标志线时，及时调整焊机头。焊接过程中，避免人员在地轨上走动，更不能将重物压在地轨上或撞击地轨。

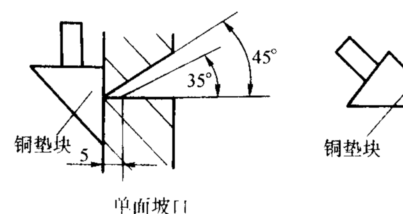


图5.1-8 横缝坡口及埋弧焊丝位置示意

② 储罐横焊的参考焊接工艺参数

a）50 000 m³储罐，日产SPV50Q钢板和SS41钢板，日产Y－E焊丝3.2，NF－11F焊剂，使用日本新日铁MISA－BH－A4横缝埋弧焊机，焊第1～4带板（日本新日铁推荐参数见表5.1-10）。

表5.1-10 日本新日铁推荐参数

厚度 /mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm·min⁻¹	线能量 /kJ·cm⁻¹
22＋16.5	400～540	25～32	25～75	10～40
16.5＋14	400～540	25～32	25～75	10～40
14＋11.5	400～540	25～32	25～75	10～40

b）5 000 m³储罐，板厚32 mm、30 mm、28 mm、25 mm、22 mm、20 mm、18 mm、14 mm、12 mm、10 mm，国产16MnR钢板，国产H10MnSi、ϕ3.2 mm实芯焊丝，HJ431焊剂，使用日本电友SH－1自动埋弧横焊机。（中石化三公司推荐参数见表5.1-11）

表5.1-11 中石化三公司推荐参数

板厚 /mm	焊道	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm·min⁻¹	线能量 /kJ·cm⁻¹
22	1～3	420	28	35	20.2
	4	39	26	35	17.3
	5	400	27	35	18.3
	6	420	28	35	20.2
	7	420	29	35	20.9
12 单坡口	1	360	25	36	15
	2～3	380	26	37	16.1
	4	370	25	36	15.1
	5	365	26	37	15.5

c）20 000 m³以上储罐，国产16MnR钢板，国产H08MnA、ϕ2.5 mmHJ431焊剂，使用日本新日铁MISA－HB－A4自动埋弧横焊机，对第6带以下的横缝进行埋弧自动焊（中油气六公司推荐参数见表5.1-12）。

表5.1-12 中油气六公司推荐参数

板厚 /mm	焊道	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm·min⁻¹	线能量 /kJ·cm⁻¹
22＋24	外1	480～490	28～30	35～40	20.2～25.2
	2	482～490	28～30	45～48	16.8～19.6
	3	460～470	26～28	50～52	13.8～15.8
	4	460～470	26～28	52～56	12.8～15.2
	内1	530～540	30～32	45～48	19.9～23
	2	480～490	28～30	50～52	15.5～17.6
	3	470～480	26～28	52～56	13～15.5
24＋20 20＋18	外1	470～480	28～30	35～45	17.5～24.7
	2	460～480	24～28	45～48	13.6～17.9
	3	430～4 160	24～26	45～50	12.4～16
	内1	480～500	28～30	45～48	16.8～20
	2	460～480	24～26	45～50	13.2～16.6
	3	430～460	24～26	45～50	12.3～15.9
18＋15 15＋12	外1	470～480	28～30	35～45	17.5～24.7
	2	460～480	24～28	45～48	13.6～17.9
	3	430～460	24～26	45～50	12.4～16
	内1	480～500	28～30	45～48	16.8～20
	2	460～480	24～26	45～50	12.3～15.9

d）板厚10～30 mm、ϕ3.2 mm实芯焊丝、HJ431焊剂。使用AUTOSAHW埋弧自动焊机（奥特公司推荐参数见表5.1-13）。

表5.1-13 奥特公司推荐参数

板厚 /mm	焊道	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm·min⁻¹	线能量 /kJ·m⁻¹
10～14	1	320～350	26～27	38～42	
	2	450～480	27～29	48～52	
16～18	1	380～420	26～27	38～45	
	2	450～480	27～29	48～52	
	3	450～520	28～31	50～65	



续表 5.1-13

板厚 /mm	焊道	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm·min⁻¹	线能量 /kJ·m⁻¹
20~22	1	380~420	26~27	50~52	
	2	450~480	27~29	45~52	
	3	450~520	28~31	50~65	
	4	470~520	28~31	55~65	
24~32	1	380~420	26~27	38~45	
	2	380~420	26~27	38~45	
	3	380~420	26~27	38~45	
	4	480~530	28~31	55~65	
	5	480~530	28~31	55~65	
	6	480~530	28~31	55~65	

e) 7 500 m^3 和 15 000 m^3 储罐，国产 Q235－A 钢板，板厚 10~22 mm，国产 JW－2，ϕ2.0 mm 实芯焊丝，SJ501 烧结焊剂。横缝内侧手电弧焊打底，使用天津中油院 D－AGW1 型倒装横缝埋弧自动焊机（大庆油田安装公司推荐参数见表 5.1-14）。

表 5.1-14 大庆油田安装公司推荐参数

板厚 /mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm·min⁻¹	线能量 /kJ·cm⁻¹
10~22	280~330	28~35	30~42	
	300~350	30~35	38~48	
	280~300	35~40	35~45	

3）储罐角缝焊接工艺 角缝埋弧焊通常采用手工电弧焊进行内外第一道打底，先内后外，焊条 E501，焊脚≥5 mm，经渗透检测合格后再进行埋弧自动焊。可使用单丝或双丝角缝埋弧焊机。

储罐焊接参考工艺参数如下。

20 000 m^3 储罐大角缝焊接采用埋弧自动焊，国产 16MnR 钢板，国产 H08MnA、ϕ2.5 mm 实芯焊丝，HJ431 焊剂，使用日本 SM－501H 埋弧自动焊机（中油气六公司推荐参数见表 5.1-15）。

表 5.1-15 中油气六公司推荐参数

焊道	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm·min⁻¹	线能量 /kJ·cm⁻¹
1	180~210	25~26	10~16	15~32
2	180~210	25~26	10~16	15~32
3	401~430	30~31	30~40	24~27
4	410~430	28~30	30~40	22~25
5	370~400	28~30	35~45	13~21
6	410~430	30~31	30~40	24~27
7	370~400	28~30	35~45	13~21

4）储罐的 CO_2 气体保护焊工艺 CO_2 气体保护焊工艺是模拟手工电弧焊操作状态，通过调整焊接小车速度、焊枪摆幅、摆频、焊丝对中位置、摆动两端滞留时间，完成焊接操作。CO_2 气体和药皮实现对熔池的气-渣联合保护。CO_2 气体保护焊工艺所使用焊丝直径小（1.2 mm、1.6 mm），焊接电流大、熔深大，可以减小坡口角度和角变形，节约焊材。焊丝干伸长量控制在焊丝直径 10 倍左右，有利于气体对熔池的保护。由于熔池的可观察性，在施焊过程中要调好焊丝对中、摆幅、摆频，如摆幅不到位会造成细长夹渣的缺陷。严格控制焊接工艺参数。焊前要控制气体含水量，CO_2 气瓶倒置 4~5 h，放水 2~3 次，使用前再放水 1~2 次。每道焊缝完成后一定要清渣打磨。施焊现场要做好防风措施，同时要注意通风。

储罐的 CO_2 焊参考焊接工艺参数如下。

国产 16MnR 钢板、板厚 24 mm、美国林肯 E712C 药芯焊丝 ϕ1.2 mm、X 形坡口 55°×14 mm×8 mm、间隙 2 mm、钝边 2 mm，背面炭弧气刨清根，渗透探伤合格后再焊；CO_2 气体纯度 99.5%、流量 25 L/min，使用美国林肯 DC600 多功能电源、美国 BUG－O 焊接小车，向上摆动多道焊（中化三建推荐参数见表 5.1-16）。

表 5.1-16 中化三建推荐参数

焊道	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm·min⁻¹	线能量 /kJ·cm⁻¹
1	110~140	25~28	6~12	15~45
2	110~140	25~28	6~12	15~45
3	110~140	25~28	6~12	15~45
4	120~150	25~28	6~12	15~45
5	120~150	25~28	6~12	15~45
6	120~150	25~28	6~12	15~45
7	120~150	25~35	6~15	15~45

5）储罐的双丝埋弧焊自动焊技术 双丝埋弧焊由于单位时间内热输量小，焊缝的热影响区小，焊接接头的力学性能得到很大提高。其焊接变形相对于单丝埋弧焊和手工电弧焊也小得多。因此，双丝埋弧焊非常适用于底板、顶板和角焊缝焊接。在低温储罐的焊接中有着良好的发展前景。

在大型储罐施工中，双丝埋弧焊主要采用串列双丝，即前后丝，对角缝尺寸较大的焊缝和厚板焊接，也可采用并列双丝。对于现场施工，一般推荐采用单电源配置，这样便于提高设备的利用率。

储罐的双丝埋弧自动焊参考工艺参数见表 5.1-17。

表 5.1-17 双丝埋弧自动焊参考工艺参数

焊缝位置	板厚 /mm	焊接层数	电流 /A	电压 /V	焊接速度 /cm·min⁻¹
平角焊	8（搭接）	前后	360	26	55

6）药芯焊丝富氩保护焊 药芯焊丝富氩保护焊可以用在焊接工作温度－33～－60℃左右的大型低温储罐，由于受焊接材料及线能量的限制，低于该温度工况的储罐焊接尚未见到采用该方法的资料。对于工作在－60℃以下的储罐，如采用 9Ni 钢建造的储罐，自动焊的方法首选 MIG 焊或自动 TIG 焊。

药芯焊丝富氩保护焊，是在普通 MAG 焊的基础上，加入焊枪的自动摆动机构，其摆动方法不同于气电立焊，而是沿焊缝宽度方向摆动并不断前进，相当于模拟手工立焊的摆动过程。焊枪的摆动曲线根据需要有多种不同的选择。

富氩保护气的组成，一般为 80% Ar＋20% CO_2，提高氩气的混合比例，可相应提高焊缝的低温冲击性能。

储罐的药芯焊丝富氩保护焊参考工艺参数见表 5.1-18。

表 5.1-18 药芯焊丝富氩保护焊参考工艺参数

焊缝位置	板厚 /mm	焊接层数		电流 /A	电压 /V	焊接速度 /cm·min⁻¹	焊丝摆幅 /mm	气体流量 /L·min⁻¹
立焊	16	外	1	150	18	13	6	20
			2	160	19	10	12	
			3	160	19	10	18	
		内	1	160	19	10	15	20



3.3 船舶焊接自动化技术

(1) 国外造船焊接现状

国外先进造船国家，由于劳动力成本高，高级焊工严重不足以及3K问题（指造船作业的苦、脏、险），焊接机械化、自动化技术的发展和推广应用非常迅速。20世纪50年代开发了埋弧焊和气电焊技术，70年代又大力开发CO_2焊技术及各种单面焊和高效焊接材料，80年代开发应用各种专用机械化设备，90年代开始应用焊接机器人，技术日臻完善，并达到实用化。目前在世界造船大国中，日本的各大船厂高效焊接方法的使用范围已占全部焊接工艺方法的90%以上。因此，他们已不再用高效率化衡量自己的焊接工艺水平，而主要发展焊接专用化、自动化和机器人化。

以下是日本造船厂船体建造各阶段高效焊接方法与机械化、自动化应用实例概况。

1) 小合龙采用各种轻便型自动水平角焊机或门架式多关节机器人。轻便型CO_2自动角焊机可以一人操作多台，大部分取代了重力焊。

2) 平行部件，采用3电极或4电极进行板列的FCB法单面高速埋弧自动焊。纵骨的焊接采用门架式多电极（10～20）双面双丝串联单熔池高速MAG自动角焊，所使用的焊丝为直径1.6 mm、耐底漆性较好的药芯焊丝（如MX－200S、MX－Z200或MX－200H），其焊接速度可以达到1.6 m/min以上。构架的肋板与纵桁及与纵骨间角焊缝、构架与底板的水平角焊缝采用悬吊式门架伸缩轴或多台小型焊接机器人进行栅格内水平和立向自动角焊，立向自动角焊采用高效熔渣型DW－100V立角专用药芯焊丝。分段翻身组成双层舱后，构架与底板的水平角焊采用CO_2半自动焊或简易自动角焊机进行焊接。日本船厂典型的平行部件自动化组焊工艺流程如图5.1-9所示。

该流水线具有很高的自动化水平和生产效率，只需要极少的作业人员，但投资也相当昂贵。

3) 曲面分段组立工程　半立体曲面分段流水线一般是在可移动的胎架上进行曲面外板的拼接和纵骨装焊。

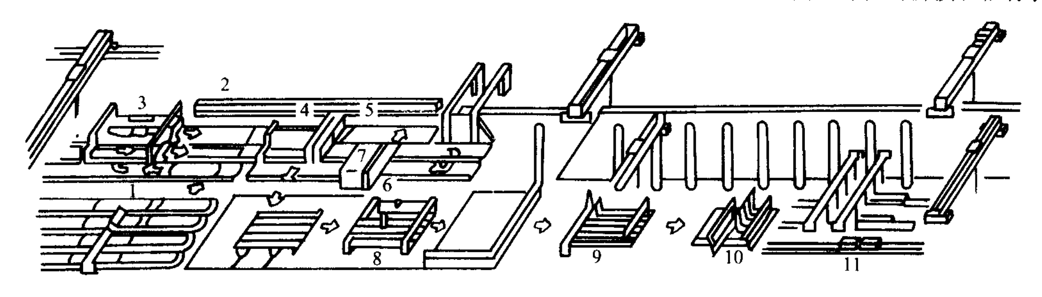


图5.1-9　平行部件自动化组焊工艺流程

（纵骨先装、单板方式）

1—NC火焰切割机；2—纵骨自动搬运装置；3—纵骨自动装配装置；4—单板自动定位装置；5—单板自动焊接装置；6—单板自动矫正变形装置；7—单板自动打磨，涂装装置；8—FCB法焊接装置；9—横向构件插入装置；10—焊接机器人；11—分段运输台车

曲面分段外板的拼接，有的在大型焊接变位机上采用小车或双丝串列摆动单面MAG自动焊机进行焊接，以取代传统的FAB法，也有采用半门架4轴数控机器人进行焊接，肋骨与外板的平角焊缝也是采用双丝串列双面自动角焊。典型的曲面外板单面焊接机器人工作示意如图5.1-10所示。

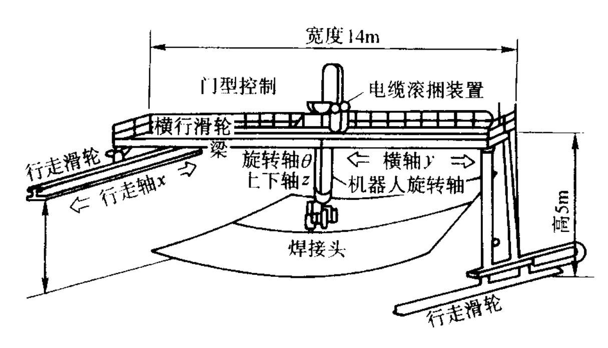


图5.1-10　曲面外板单面焊接机器人工作示意

双丝串列摆动单面MAG自动焊机前导焊丝采用ϕ1.6 mm的实芯焊丝（如MG－50D或YM－55H），后随焊丝采用ϕ1.6 mm的药芯焊丝（如DW－55E或SF－1），其对接接头不留钝边和间隙，反面贴装表面加玻璃纤维带的普通CO_2陶质衬垫，在50°坡口内填加切丝（1.0 mm）单道焊可完成厚度22 mm钢板的对接，其焊接效率很高，这类焊机的典型型号有VT－MAG，NS－1500等。

4) 外业（船坞、船台）大合龙工程　除舷侧傍板平直部分对接缝采用垂直气电焊外，还采用横向自动气电焊，FAB单面埋弧自动焊用于内底板和上甲板的对接焊，也有采用单丝或双丝单面MAG自动焊和可搬式有轨道或无轨道焊接机器人进行单面MAG对接焊。

综上所述，日本船厂近十年来焊接机械化、自动化的发展特征是大热输入，多丝化、高速化，大量应用各种简易MAG自动焊机，开发和应用各种焊接机器人。1998年日本造船焊接平均自动化率为88%，平均机械化率为35.2%（自动化率是机械化率的延伸，它当然包含半自动焊），而机器人化率10年间变化不大，平均在1%左右波动，少数船厂达到15%。

(2) 国内外造船高效焊接机械化自动化的差距

1) 机械化自动化程度和水平相差很大。国外半自动焊为23%，自动焊为68.3%，机械化率为91.3%；而国内半自动焊为22%，自动焊为22.6%，机械化率仅为44.6%。两者自动焊和机械化率相差一倍以上。国外先进船厂CO_2保护焊应用率已达80%以上，手工焊仅占8%左右，一些大型船厂几乎看不到手工焊，而国内船厂CO_2保护焊应用率仅为44.14%，手工焊占37%。

2) 在焊机构成方面，日本船厂CO_2焊机的占有率1996年为71.19%（平均每位焊工拥有2.9台），我国1999年为22.22%，1998年日本船厂拥有简易自动焊机4 400余台，10年增长了5.7倍，而我国不足300台，实际应用比此数更少。从焊接设备的先进性方面来看，国内弧焊电源大部分采用多站式交直流（硅整流）手弧焊电源和可控硅整流电源，而国外大部分为逆变焊接电源。国内少数船厂应用MAG自动焊机，大部分为半自动焊机，焊接机器人的应用尚属空白，国外大部分采用MAG自动焊机，部分船厂已实现焊接机器人化。

3）国外船厂普遍建立平面分段生产线，且部分船厂20世纪90年代建立或改造的生产线，自动化、机器人化程度和生产效率极高，部分船厂建立了管子加工生产线。国内虽然部分船厂引进平面分段生产线，个别船厂引进管道加工生产线，但自动化程度较低或配套装备不够完善，以及管理水平等问题运行效率不够理想。

4）当前国内船舶焊接机械化、自动化的发展，处于以推广 CO_2 半自动焊为主体并向专用机械化焊接过渡阶段，而国外船厂则处于以专用机械化焊接为主，并处于示教型机器人焊接向智能型机械人焊接发展，进而向无人监视化发展的阶段。

3.4　机器人焊接集箱管接头技术

电站锅炉制造中集箱是承受高温高压的重要部件之一，在集箱壳体全长通常焊有大量密排的接管，有长度小于300 mm的短管接头，也有弯成一定形状的长管接头，通常一个集箱少则几十个管接头，多则几百个管接头。在整个集箱焊接工作中管接头的焊接工作量占其总工作量的大部分，如何保证管接头焊接质量成了集箱制造的关键。目前，国内集箱长管接头的焊接大部分仍然停留在手工电弧焊的水平上。焊接机器人的采用可以消除人为因素对产品质量的影响，提高生产率，改善劳动条件，保证产品的质量。

（1）焊接机器人系统的组成及特点

该焊接机器人工作站是由日本的 MOTOMANSK－16 弧焊机器人、控制器 YASNACMRCⅡ及相应的焊接电源、送丝机构、冷却系统和预热装置组成。MOTOMANSK－16 弧焊机器人机构形态为垂直多关节形，具有6个自由度，重复定位精度为 ± 0.1 mm，每个轴均采用 AC 伺服电机驱动，最大抓重为6 kg。

在机器人上配有焊枪及相应的送丝机构、水路和气路。通过编程器输入指令，执行焊接程序，实现管接头的焊接。其控制器型号为 YASNACMRCⅡ，内存容量可以执行2 200步动作。该控制器可以在示教状态下编程，并在主程序中加入焊接程序、台车移动程序及掐丝、清理喷嘴程序，以实现多个管接头的连续焊接过程。由于是连续焊接，为避免焊枪过热，在系统中采用封闭式的净化水循环冷却系统。该设备可焊集箱直径：$\phi 219 \sim \phi 914$ mm；集箱长度为3～22 mm；集箱管接头直径为，$\phi 28.1 \sim \phi 90$ mm（长短管接头均可）；管接头净间距为，长管接头 ≥ 50 mm，短管接头 ≥ 35 mm。

（2）系统辅助工装

由于所焊产品的直径相差很大，在 $\phi 219 \sim 914$ mm 范围内，质量可达28 t。为了保证机械手能够始终处于最佳状态，自行设计了一套辅助工装（见图5.1-11），通过调节V形架上的螺栓，实现V形架的升降。经过试验，该工装既能满足各种规格集箱产品的焊接生产需要，又大大降低了成本。

（3）示教及再现

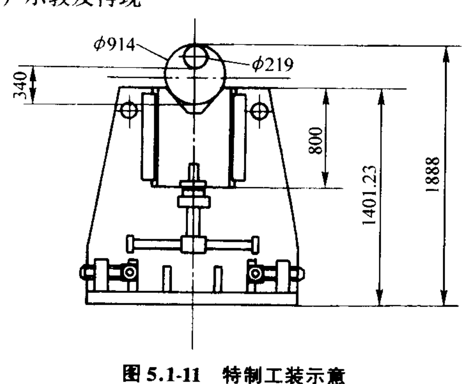


图 5.1-11　特制工装示意

弧焊机器人是严格按照操作人员编制的示教程序来完成动作轨迹的。通常可根据管接头直径选择每个圆周5～8个示教点，根据焊缝坡口深度确定焊接层数，坡口的形式决定每一层焊枪的倾斜角度均有所不同，使坡口填充得饱满并满足图纸要求，见图5.1-12。另外，除了设定相应的焊接电流、电弧电压外，影响焊缝成形的主要因素是焊接速度，因为管接头在集箱筒体上开孔，孔座形式是马鞍形的，在腰部及肩部有落差，导致肩部及腰部熔敷金属量不同，通过调整焊接速度，改变整个焊接过程中热输入的分布，获得满意的焊接接头。

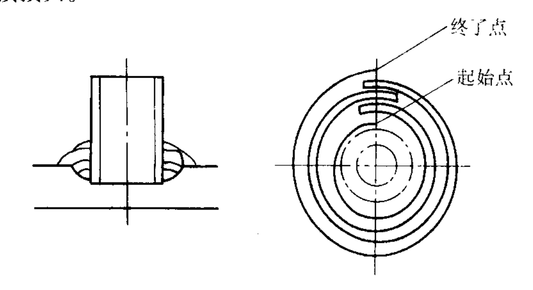


图 5.1-12　焊接坡口及焊接顺序

焊前，通过参考点的设定，使每一次焊接前将用户坐标系重新设定，焊接程序就可以以参考点为中心进行平移。机械手前部的探测器通过探测集箱及管接头，将其管座的竖直、水平位置偏差记录下来，在焊接系统中加以补正，由于其重复精度很高，完全可以消除因机械加工及点焊装配管接头带来的误差。同时，由于其再现精度较高，一套焊接程序，只要所焊集箱直径、管接头直径相同，就可以反复应用同一示教程序，不用重复示教，可大大提高生产效率。在工件摆放和焊接加热过程中不可避免地会出现水平、竖直及挠度方向的偏差，除通过探测器的检查外，还可以在 HOSEI 程序中进行设定，实现动态修改，及时将焊接时的偏差加以修正。

（4）预热及后热装置

电站锅炉集箱的材质大部分是合金钢，合金元素含量高，壁厚大，有的壁厚达到148 mm，在焊接过程中存在严重的冷裂倾向，要求焊前对工件进行预热，预热温度随焊接材质的不同而不同。焊后根据实际情况进行后热处理。采用机械手自动焊接装置，可以将这两个工序编入主程序，在一次焊接过程中完成。系统的加热装置安装在机器人台车上，采用霞普气火焰进行焊前预热及焊后热处理，共有前后两组加热装置，每组含有四把加热枪，采用电气驱动控制加热枪与被焊工件的位置，具体的加热时间以及加热枪移动距离均可在程序中作出相应设定。

（5）常见缺陷及防止措施

机器人焊接采用的是 $Ar + CO_2$ 混合气体保护焊，Ar 气与 CO_2 混合比例是4:10，在焊接过程中，经常产生的缺陷主要有气孔、咬边、层间未熔合、焊偏等，其产生原因和改善措施见表5.1-19。

表 5.1-19　常见焊接缺陷及防止措施

缺陷类型	产生原因	改善措施
气孔	气体保护差或无保护 气体流量过大	调整气体流量
	气路不通畅	检查焊枪并清理喷嘴
	气体含水量高	检查气体干燥器是否通电
	无保护或流量过小	检查气瓶中是否有气体
	焊枪角度不对，保护差	调整示教位置

续表 5.1-19

缺陷类型	产生原因	改善措施
咬边	焊接参数不合适	调整工艺参数
	焊枪角度或焊接位置有问题	调整示教姿态及位置
焊偏（一侧焊至母材，一侧未焊满）	探测位置与示教位置有误差	调整焊枪位置（在XYZ型程序上调整），采用补偿程序 Hose1
起弧及收弧部位焊缝太大	搭接太大	调整示教位置
	搭接处焊接速度太慢	加快搭接处焊速
层间未熔合	示教位置不对，工艺参数有问题	调整示教位置，调整工艺参数

4 焊接生产自动化发展方向与关键技术

4.1 发展方向

与国外发达国家相比，我国的焊接自动化技术与装备在质量、水平、品种、自动化程度以及推广应用等方面还有很大差距，特别是我国的焊机制造厂尚未形成国际著名品牌，缺少自主知识产权的高新技术产品，这些问题都会制约我国进入WTO以后焊接界的发展与竞争能力。

据市场经济信息分析，今后十年，中国将逐步成为全球制造中心，我国传统制造业势必将按现代化的高标准要求进行全面的升级和技术改造。目前我国焊接结构用钢已超过 8×10^7 t，今后几年还将逐年上升。因此对焊接装备特别是自动化焊接装备的需求量将明显增加，尤其是在锅炉、压力容器、船舶、钢结构、桥梁、汽车、机车、冶金设备、采矿机械、石油化工装置，饮料食品加工机械，家用电器、医疗设备和半导体器件等重点制造行业中，自动化专用成套焊接设备、焊接机器人工作站与焊接生产线的市场容量相当大，发展前景可观。如果不考虑国际市场，国内市场每年的需求量将达到15亿元以上。因此我国焊接装备制造业必须把握这一机遇，加快发展焊接生产自动化技术与装备，以适应我国经济建设的快速发展。

4.2 进一步发展焊接自动化的关键技术

目前国内外在焊接自动化技术与设备的研究开发热点主要为以下三个方面：焊缝自动跟踪，特别是视觉跟踪技术；焊接过程熔滴过渡控制；焊缝成形控制，包括焊接熔深控制，全位置焊接参数实时控制技术以及单根焊缝的单面焊双面成形技术。这三方面的发展与应用现状如下。

（1）焊缝自动跟踪技术

焊缝自动跟踪系统一般由传感器、微机控制电路与执行机构三部分组成。

传感器是焊缝自动跟踪系统中最关键的部分，除了常用的接触式对中传感器以外，目前研究得较多的是以下几种传感器。

1）电弧传感器　其原理是从弧长变化所引起的电弧参数的变化中导出焊炬与焊缝的相对位置等被传感量。图5.1-13所示为旋转电弧传感器采用特制的空心电动机旋转扫描焊炬，机械振动小，焊炬可达性好，能检测焊缝焊炬横向与高低方向偏差及焊缝坡口表面轮廓线。

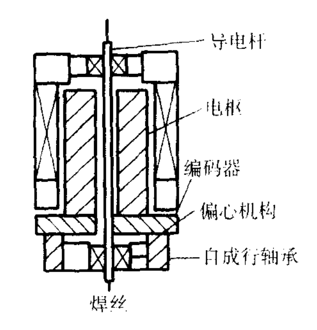


图 5.1-13　空心电动机旋转扫描焊

2）激光扫描式视觉传感器　其结构如图5.1-14所示。与单点的三角测量系统相比，此传感器增加了扫描电机、同步扫描机构和测角元件，相应的光学结构变得较为复杂。这种同步扫描方法由于所带的负载比较轻，扫描频率可以比较高。在焊接过程控制的应用中，此种传感器测量时的光线遮挡方向与接头方向接近平行，能够有效地解决遮挡问题。

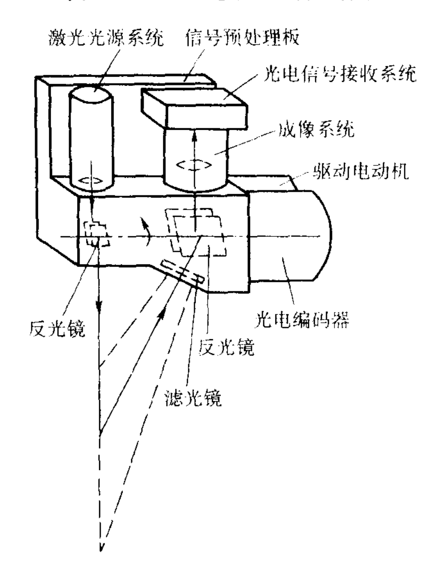


图 5.1-14　激光扫描式视觉传感器结构示意

3）基于结构光的视觉传感系统　如图5.1-15所示，激光器产生的线结构光投射到工件表面，经反射后由线阵CCD接收。焊缝坡口附近的特征点 $A-B-C-D-E$ 在线阵CCD上的对应成像为 $a-b-c-d-e$ 点。经过计算可以描述出焊缝坡口的截面形式和具体尺寸。目前此类系统已在焊缝跟踪、坡口形状与接头形式检测、多道焊排道等方面得到应用。

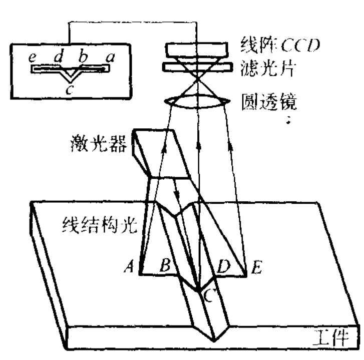


图 5.1-15　基于结构光的视觉传感系统

4）CCD视觉传感器　此传感器的工作原理是采用CCD摄像机实时获取焊接区域的视觉图像，再通过计算机分析和处理，从视觉图像信号中提取出焊缝偏差和弧长信息。一种CCD传感器通过选用合适波长的滤光片和合理的摄像机拍摄时刻，所获得的TIG脉冲焊清晰的焊缝视觉图像。图5.1-



16a 的视觉图像中同时反映了熔池、焊道、电弧及钨极的成像等焊接信息。经过图像处理后，对三者的空间相对位置进行解耦运算，可以分别得到熔池中心（弧斑）与焊缝中心的偏差及弧长信息。该 CCD 传感器成功应用于由厚度为 0.33 mm 的 3 mm×4 mm 矩形管螺旋盘绕而成的液体火箭发动机尾喷管缩比件的精密焊接，取得了较好的工艺效果。

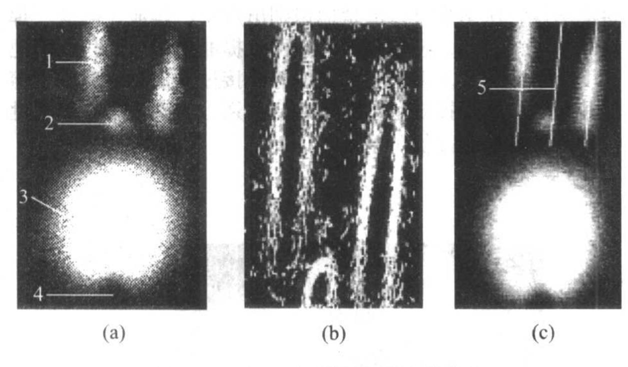


图 5.1-16　TIG 焊焊缝图像及其处理

1—焊缝棱线；2—熔池；3—电弧；4—钨极；5—测出的焊缝中心线

（2）熔滴过渡控制技术

1）一脉冲一熔滴控制　GMAW 焊接时在熔滴的电弧根部形成能够发射弧光的金属蒸气源，当缩颈破裂之后，覆盖整个熔滴根部的弧光立即熄灭，跳到焊丝的新顶端，这大大减小了电弧发射光通量。熔滴过渡后，弧光通量增加。基于这一现象，检测脉冲 GMAW 焊接过程中电弧光通量的改变，来检测熔滴过渡，在此基础上可实现“一脉一滴”控制，见图 5.1-17。

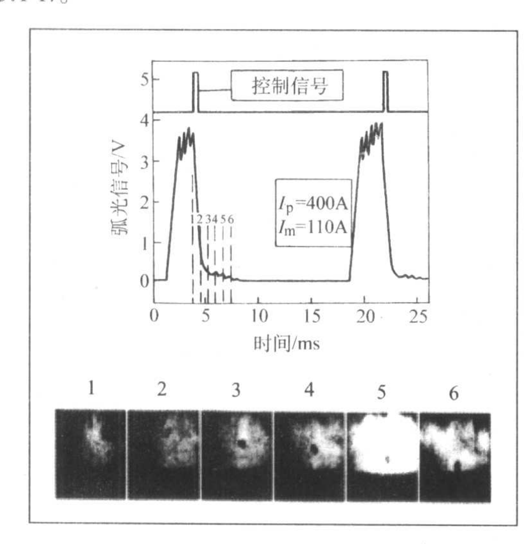


图 5.1-17　基于弧光传感的 MIG 焊熔滴控制

ZhangY. M. 研究了 MIG 焊熔滴受激过渡的控制方法，如图 5.1-18 所示。通过峰值电流向基值电流的快速切换来激励熔滴的分离，随即监测熔滴的运动，在检测到熔滴下端具有快速与熔池接近的趋势时，迅速将焊接电流由基值切换至峰值，使熔滴在下向动量及强电磁收缩力的作用下脱离焊丝端部，由于利用了熔滴向下运动的动量，因而无需传统脉冲 MIG 焊接方法中迫使熔滴脱离焊丝的大电流，避免了焊接过程中熔滴随机过渡现象的出现。

2）CO_2 焊熔滴控制　短路 CO_2 焊接熔滴形状及尺寸是影响焊接工艺性能和焊缝质量的重要因素。为了分析影响熔滴尺寸的因素和规律，了解熔滴控制效果，建立了以 He-Ne 激光器为背光照明的熔滴高速摄像研究系统。高速摄像机

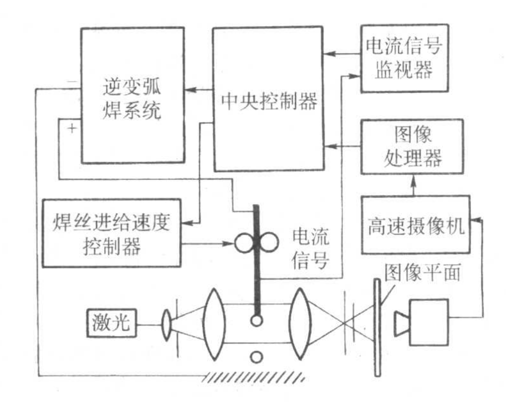


图 5.1-18　MIG 焊熔滴受激过渡控制原理

以 955 帧/s 的速度，每次连续拍摄 8 000 帧熔滴图像。通过对熔滴尺寸与电弧信号相关参数的动态分析，发现短路前熔滴体积及燃弧能量的随机性分布是造成熔滴尺寸不均匀分布的重要原因，而熔滴尺寸与其对应的再燃弧电压有着良好的相关性。在此基础上，确定了将再燃弧能量作为逐个熔滴尺寸控制的反馈量，通过控制燃弧能量，来实现熔滴尺寸闭环控制的方案，取得了较好的控制效果（见图 5.1-19）。

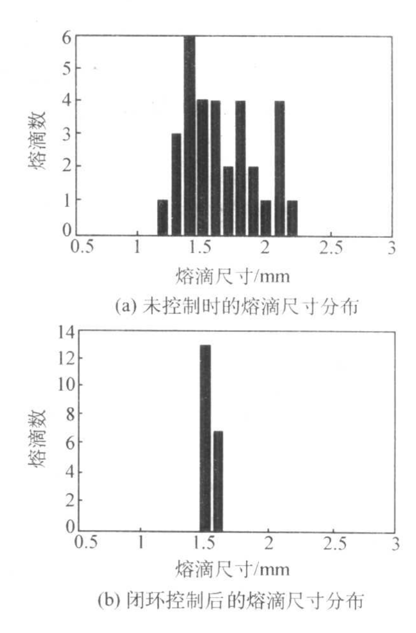


图 5.1-19　熔滴尺寸闭环控制效果对比

（3）焊缝成形控制技术

1）TIG 焊缝成形控制　山东大学建立了基于 CCD 摄像机的脉冲 TIG 焊接熔池几何参数计算机视觉信息检测系统，从试件正面采集到比较清晰的熔池区图像信号，从而检测出熔池的熔宽、熔池半长、熔池后部面积、熔池后拖角等几何参数。

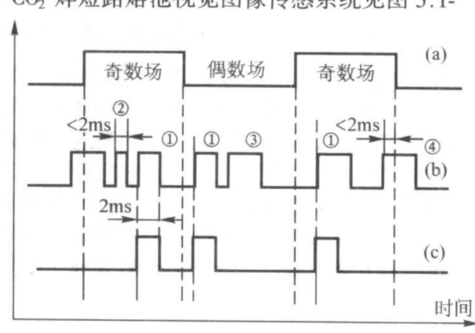
R. Kovacevic 等开发了一个基于视觉传感与控制的 TIG 全熔透焊焊缝熔合状态闭环控制系统，该系统采用 CCD 摄像机从焊缝正面获取熔池图像，借助图像信号处理算法和模糊神经模型测量、预测正面及背面熔宽信息，从而控制焊缝熔合状态。

英国的 J. S. Smith 和 J. Lucas 等采用计算机视觉传感技术在脉冲 TIG 焊的焊道面积跟踪、焊道轮廓检测、多道焊排道、窄间隙焊等方面开展了大量的研究工作。1991 年开发成功正面焊道面积控制系统，该系统采用 CCD 摄像机，在电弧电流在基值的 3 ms 间隔期间，获取焊道视觉图像，经计

算机处理，得出实际焊道面积与目标焊道面积的偏差信息，通过调节脉冲电流时间来控制正面焊道面积。

2）MIG 焊熔深控制　通过周期性的减少 MIG 焊的焊接电流，在小电流期间摄取熔池图像，排除了弧光干扰，可获得清晰的熔池图像。从图像中可以直接提取熔池宽度，实时地调节焊接电流，从而控制焊接熔深。

3）CO_2 焊熔池尺寸控制　与 TIG、MIG 焊的视觉图像检测相比，CO_2 焊熔池信息的视觉检测相对困难一些，必须解决摄像机的固定工作时序与短路发生的随机性之间的矛盾，避开电弧闪烁和飞溅、烟尘的干扰问题。鉴于在 CO_2 焊熔滴短路阶段弧光及飞溅的干扰较小，是获取熔池图像的最佳时期，研制了一种 CO_2 焊短路熔池视觉图像传感系统见图 5.1-20，该系统采用专门的摄像机设置开始及结束时刻的同步逻辑控制电路。该电路在接收到短路信号后开始曝光，保证每场只曝光一次，曝光时间为 2 ms（图中①），对于短路时间小于 2 ms 的非正常短路（图中②）、短路开始 2ms 内出现跨场（图中④）以及同一场中出现的第二次短路（图中③）等现象自动加以屏蔽。图 5.1-20d 给出了系统拍摄到的 CO_2 焊熔池图像，从图中可以清楚地识别出焊丝、熔池、熔渣、焊丝短路点等特征，经过图像处理可以提取出熔池面积、熔池长度、熔池宽度及熔池轮廓曲线等焊接过程信息，建立了熔池几何参数与焊接规范参数的对应关系，为实现 CO_2 焊视觉传感与质量控制提供了基础。



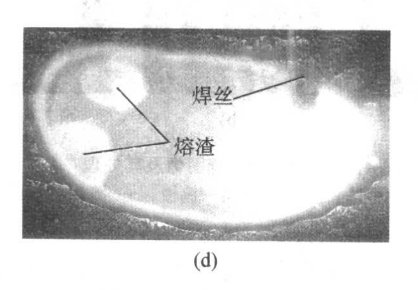


图 5.1-20　CO_2 熔池视觉传感系统同步逻辑及典型的熔池图像

（a）工业 CCD 曝光时序；（b）短路过渡时序；（c）同步逻辑时序；（d）典型的 CO_2 熔池图像

编写：蒋力培（北京石油化工学院）



第 2 章　焊接过程信息检测技术

1　概论

在传统的焊接生产过程中，焊接产品的质量是依靠焊工的熟练程度来保证的。例如在弧焊过程中，焊缝的位置与焊枪的对中、熔池的几何尺寸及状态等都是由人的观察和控制来实现的。然而，在迅速发展的电子、信息等新技术的推动下，焊接技术也正不断地从一种经验性的工艺方法向“定量”或“精量”化的材料加工科学变革。现代工业的制造方式及其过程质量的控制与管理对焊接生产的机械化和自动化不断提出了新的要求，其主要原因是：确保焊接产品质量的一致性；提高生产效率；减轻焊工的劳动强度和改善工作的环境。但是，焊接生产过程是一个复杂的材料成形加工过程，伴随有热、电、力的作用以及物理与化学的反应，具有工艺变量多且耦合性强、变化区域小、变化速度快以及影响因素随机性大等特点。同时焊接生产的工作环境相对恶劣，存在高温、强电磁场及其辐射、熔融金属的飞溅、烟尘的散发等不利条件。因此，首先需要解决如何利用当前的信息传感技术替代焊工的感知功能，在线检测与获取焊接过程的各种信息，以便能对焊接过程的参数进行实时调整和控制，从而使焊接接头的质量达到预期的要求。这是实现焊接生产自动化的重要环节和关键技术之一。

当焊接方法确定后，对于一个焊接过程及其质量而言有以下三个信息来源。

1）操作变量　由操作者输入的变量是在焊接前预先按已有的经验或规范设定的，如在熔化极气体保护焊中需要设置的变量有焊接电流或送丝速度、电弧电压、焊接速度、焊丝干伸长、焊枪角度、保护气体流量等，这些变量直接影响焊接的结果。

2）干扰量　对于焊接过程来说，任何干扰都是不希望的但又是不可避免的。例如，在弧焊中常有坡口间隙或散热条件的变化、导电嘴磨损、工件表面污染、送丝阻力、熔滴飞溅或电网电压的波动等随机因素的影响，均会不利于焊接产品的最终质量。

3）焊接接头的变量　由于至今尚无可行的方法对焊接加工的最终结果如焊接接头的力学性能、微观组织等作出在线的检测。因此，实际可监控的是与最终结果有一定对应关系的间接变量，例如温度、熔池尺寸、焊缝外形等。

图 5.2-1 以弧焊过程为例说明了上述各量的关联性。即从所设定的能量、质量的输入（如焊接电流、电弧电压以及焊条或焊丝的填充等）以及过程中随机因素的影响到对所期望的焊缝几何尺寸及其力学性能与材料组织性能的关系。要实现焊接过程质量的监控，首先必须准确、实时地获取关于过程的各种信息及其变化情况，其中包括电参数及非电参数。因此，传感技术是当前焊接自动化生产中的一个关键技术，选用合适的传感器在焊接过程中通过对影响焊接结果的内部和外部条件的检测，并采取有效的措施以确保焊接产品达到预期的品质。

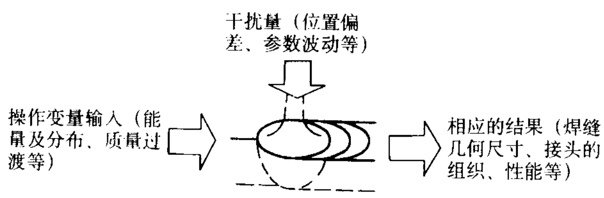


图 5.2-1　焊接过程及其质量的各影响因素的关联性

焊接现场的各种干扰和较差的工作条件对焊接传感器也提出了较高的要求，即不仅要有一定的精度、响应速度和稳定性，而且要求对焊接空间的干涉小、抗干扰能力强，同时要求易维护、坚固耐用。近年来，随着微电子技术和计算机水平的迅速发展，越来越多的传感器应用于自动化焊接生产过程的监测与控制中。基于多种传感原理和技术的焊接传感器已形成一个庞大的体系，其中包括电弧传感、光学传感、力学传感、声学传感、电磁传感、温度传感等，这些传感方法及其相应的传感器件是当前焊接过程信息传感的主要形式。早年开发的用于焊接位置搜寻和对中的接触式传感器，也随着电子技术的进步在性能上得到不断的改进和提高。表 5.2-1 列出了典型的焊接过程物理参量、对应的传感方法以及检测量的单位。

表 5.2-1　典型的焊接过程物理参量、对应传感方法及检测量单位

物理量	传感器	单位
时间	计时器	周期①
温度	热电偶，电阻法测温仪，热敏电阻，高温计	K
力	压电元件，差接变压器，电容式力传感器	N
压强	位移式或薄膜式压强传感器	Pa
流量	差分压强流量仪，机械式流量仪，质流仪	L/min
电流	分流器，霍尔传感器，环形线圈	A
电压	电压计	V
位移	电位差计，电压差动变压器，电感、电容、超声式传感器，数码器，机器视觉传感器	m
速度	电位差计，电压差动变压器，电感、电容、超声式传感器，数码器，机器视觉传感器	m/s
加速度	电位差计，电压差动变压器，电感、电容、超声式传感器，数码器，机器视觉传感器	m/s^2
辐射（可见光、红外线、紫外线）	光电二极管，光电晶体管，光电倍增管	cd
声能密度	拾音器，压电元件	J/m^3

① 周期定义为基于某一频率的时间间隔。

在本章中，将介绍各类焊接方法的信息特点、检测技术及相应的传感器原理及其应用，其中包括电弧焊、电阻焊、激光焊、电子束焊、摩擦焊以及钎焊等过程信息的传感技术。

2　焊接过程的信息及传感方法

2.1　弧焊过程信息的传感

在自动化或机器人方式的弧焊过程中，由于工件尺寸的公差、装配精度与间隙、坡口及边缘准备、热应力与变形等随机因素的影响，会使示教或预定的轨迹以及焊接的起始点位置等发生变化。因此，需要对弧焊过程的有关信息进行传感，以确保产品焊接质量的稳定和一致。



对弧焊过程及其质量信息的传感可分为两大类：一类是在焊接过程中对焊枪与焊缝的相对位置、工艺参数、设备状态及其动作顺序等进行的监测，通常监测的参数见表5.2-2；另一类是在焊接结束后对焊缝外形尺寸及表面缺欠的检测，从而对焊缝的质量作出评定。但直到目前在实际生产中还难以在线获取关于焊缝的熔深、内部缺陷等信息。

表 5.2-2　弧焊过程的信息传感

变　量	监　测	控　制
弧长	√	√
弧压	√	√
电流	√	√
燃弧时间	√	√
焊接速度	√	√
保护气体流量	√	√
焊接区温度	√	√
弧光	√	
弧声	√	
焊接接头位置	√	

2.1.1　弧长和电弧电压

在焊接过程中，焊枪与工件之间距离的变化会引起其他工艺参数的改变，并造成焊缝几何尺寸的改变，因此需要对电弧的长度进行监测。电弧长度的确定通常是通过电弧电压的检测。电弧电压与电弧长度 l 具有以下的比例关系：

$$V_A = E + \frac{\Delta V_A}{\Delta l_A} l_A$$

式中，V_A 为弧柱电压，V；E 为阴、阳极区的压降，V；$\frac{\Delta V_A}{\Delta l_A}$为弧柱电压相对于弧长的变化率，V/mm；$l_A$ 为电弧长度，mm。对电压的检测中，为使信号满足量程和数据采集的要求，较多的采用电阻分压方法。

在钨极氩弧焊条件下的电弧长度 l_A 通常是指电极顶端到熔池表面的距离；在熔化极气体保护焊中是指焊丝端到熔池表面的距离。该方法是以电弧本身作为传感器实现对电弧长度的传感，具有简单实用的优点。然而，在脉冲电流或电弧长度较短的场合会出现灵敏度低、误差大等局限性。另外，对电弧长度信息的传感方法还有电感式或电容式的接近觉、视觉传感器等。在钨极惰性气体保护焊过程中，电弧的声音或电弧光的辐射与电弧的电弧长度呈现出一定的比例关系。

2.1.2　焊接电流的传感

焊接电流与电弧电压是弧焊过程的两个基本物理量，对其信息检测的方法已有许多种，如对交流焊接电源输入和输出端的电流测量均可采用互感式传感器（见图5.2-2），对输出端的直流电流测量采用分流器（见图5.2-3）。

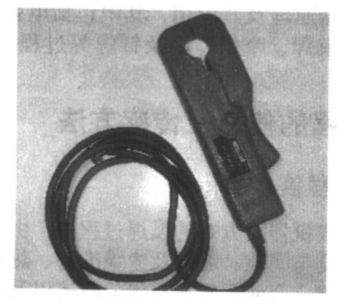


图 5.2-2　钳式互感器
（输出的电压信号可直接供数据采集）

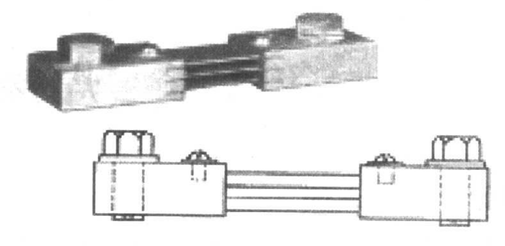


图 5.2-3　直流分流器

近年来随着电子技术工业化应用水平的提高，越来越多地利用霍尔器件实现对电流、电压的非接触测量。霍尔器件的基本原理是，将一半导体薄片置于磁场中，当有电流 I 流过时，在垂直于电流和磁场的方向上将产生电动势，这种物理现象称为霍尔效应。利用霍尔效应制成的传感器具有下述优点。

1）对磁场敏感，可在静止状态下感测磁场的变化。

2）由于原信号和测量电路之间是通过磁场耦合的，所以两者之间没有电的联系，实现强电与弱电之间的隔离，且不从磁场获取能量，没有电路中的负载效应。

3）结构简单，体积小，使用寿命长。

4）频率响应宽，从直流到微波段动态范围大，输出电势的变化可达1 000:1。

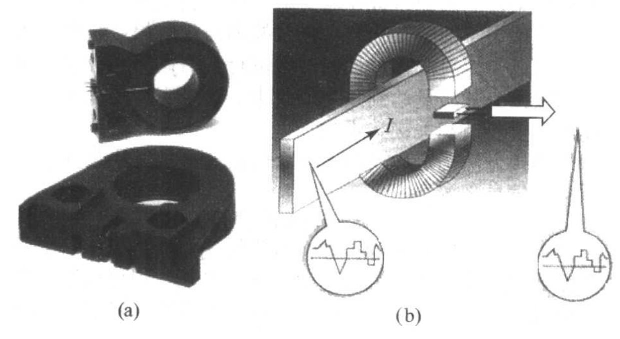


图 5.2-4　霍尔电流传感器（a）**及其原理**（b）

基于霍尔器件的电压传感器工作原理与电流传感器基本相同，只是在输入端需外加一个精密电阻将电压信号转换成电流信号。在使用该类电压传感器时要注意防止外界磁场的干扰。

2.1.3　焊接起始点位置的搜寻

如前所述，一些随机因素会造成焊接工件位置的偏移。因此，在机器人方式的弧焊过程中需要对焊接的起始点位置进行搜寻，以便在线调整焊枪的路径。

对待焊接头起始点搜索的基本思路是，在机器人的搜索模式下，用一低压直流信号作用于探头与工件之间，用探头与工件的表面作多点接触，当工件位置出现偏移时，与搜索时间有关的电流或电压信号就有改变，通过计算检测点和示教点的差别，从而确定待焊接头的实际位置，见图5.2-5。目前主要有两种方式，一种是以钨极或焊丝的本身作为传感

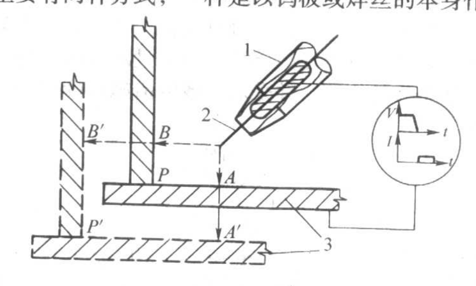


图 5.2-5　焊接起始点位置搜寻示意
（A，B，P 是原示教点位置，A' B' P' 是工件偏离位置）
1—导电嘴；2—焊丝；3—工件位置偏差

器的探头；另一种方式是以焊枪的喷嘴作为传感探头。这一传感方式的优点是不需要附加其他传感器件，对位置的检测精度可达到 ±(0.2~0.3)mm，通常与基于电弧传感的焊缝跟踪配合使用。其缺点是前者作为探头的电极或焊丝在搜寻过程中容易弯折或位移；后者易受附在喷嘴上的飞溅物的影响，有时会出现使焊枪或喷嘴变形或位移情况，影响定位精度。因此其定位精度取决于多个因素，如执行机构、搜寻速度、传感器响应时间以及焊接工件表面油污造成的导电不良等。

其他对焊接接头起始点定位的传感器还有基于激光结构的光的信息传感或电容式的接近觉传感等方式。

2.1.4 焊缝跟踪

在自动化焊接生产中，如何使焊炬与工件待焊焊缝之间设定的相对位置保持不变，是一个具有普遍性的关键问题。因此，需要对待焊焊缝的位置进行在线监测，以便纠正焊枪与焊缝相对位置之间的偏差。图 5.2-6 所示为对焊缝位置自动跟踪传感器的分类。各类传感器的原理、特点及应用等将分述如下。

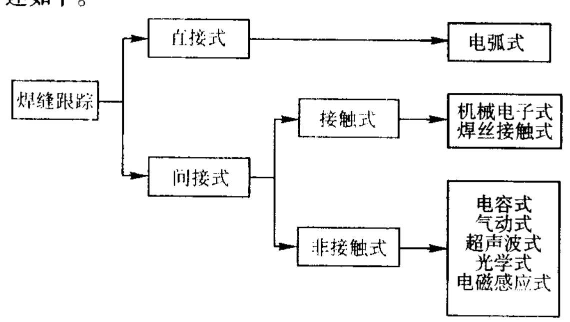


图 5.2-6　焊缝跟踪传感器分类

（1）接触式传感器

机械式传感器是一种接触式传感器。它以导杆或导轮在焊炬前方探测焊缝位置。一般将该类传感器分为两种形式。一种是限位开关式，通过控制输出信号的开关状态，逐步地实现对焊缝的跟踪；另一种是电位计或差动变压器式，当焊炬与焊缝中心线发生偏离时，发出一个与位置偏离的大小成一定比例关系的信号，控制驱动装置使焊炬恢复正确位置，从而实现对焊缝位置的连续跟踪。表 5.2-3 中列出了接触式焊缝位置传感探头的几种形式。机－电信号的主要转换方式见表 5.2-4。

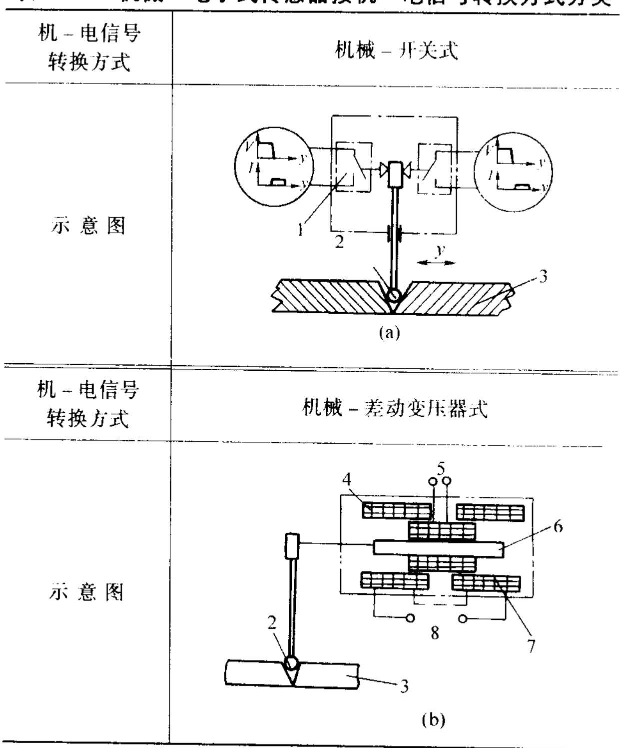
表 5.2-3　接触式焊缝位置传感探头的几种形式

形式	用导轮接触焊道间隙	用导杆以焊道与坡口面交点为基准
示意	≥0.5	
形式	用导杆以坡口中心为基准	用双导杆以工件表面为基准
示意	≤90°	

1）机械－开关式　机械－开关传感器的触杆中部用铰链固定在传感器盒，下端伸进坡口（见表 5.3-4 中的图 a）。当焊枪偏离焊缝中心时，触杆向一侧偏转，此触杆上端接通一微动开关，驱动电机转动，使传感器回到平衡位置，此时开关断开，电机停转，从而保证焊缝的对中。

2）机械－差动变压器式　机械－差动变压器式传感器是由一具有可滑动铁心的差动变压器组成（见表 5.2-4 中的图（b）。两个次级线圈反极性串联，当水平滑动的铁心处在中间位置时。两个次级线圈的感应电动势相等，故总输出电压为零，此即为平衡状态。传感器的触杆下端深入坡口内，当传感器的位置与焊缝坡口中心发生偏差时，触杆直接带动铁心移动，使两个次级线圈的感应电动势不等，而输出的极性取决于偏差方向，大小取决于电压的偏差量，从而实现自动跟踪。

表 5.2-4　机械－电子式传感器按机－电信号转换方式分类



机－电信号转换方式	机械－开关式
示意图	1　2　y　3 (a)
机－电信号转换方式	机械－差动变压器式
示意图	4　5　6　2　8　7　3 (b)

注：1—微动开关；2—跟踪探头；3—工件；4—位移传感器；5—交流电源；6—可移动铁心；7—探测线圈；8—信号输出。

机械式传感器结构简单，价格便宜、不受电弧、烟尘及飞溅等干扰，但其缺点是不同形式的坡口需不同的探头，且探头的磨损大，易变形，跟踪精度难以保证，对定位焊点的障碍难以克服，在跟踪时探头与焊缝之间的偏转角度一般不大于 ±60°。

（2）电弧传感器

电弧传感器是直接利用电弧自身参数的变化作为跟踪信号，不需外加传感器，即在焊炬与工件相对位置发生变化时，从电弧自身电参数的变化中提取所需的信息。在焊接过程中，焊炬与工件之间的相对位置变化会引起电弧电流和电弧电压的静态及动态变化，电参数的静态变化或动态变化都可作为特征信号被提取出来用于焊炬的高低及水平两个方向上的跟踪控制。电弧传感具有实时性强、灵活性好、信号检测和处理比较简单等突出优点，尤其适合焊接低成本自动化的要求，并且由于该种传感方法不占用额外的空间而有利于机器人的可达性。但其应用范围有一定局限性，例如：必须在电弧点燃的条件下才能工作；电弧在跟踪过程中要进行摆动或旋转；适用的接头类型有限，当焊缝坡口深度小于 2.0~3.0 mm 时，焊缝位置信号的检测比较困难；不能应用于薄板工件的对接、搭接；在熔化极短路过渡模式也存在应用困难等问题。电弧传感器常见的有单丝电弧摆动、旋转式、并



列双丝式等几种形式。图 5.2-7 和图 5.2-8 分别为电弧传感器工作原理以及不同特性弧焊电源电弧传感器工作原理。图中，I 为电流值。下标 L 为口左侧，R 为右侧，l 为某一位置的弧长。

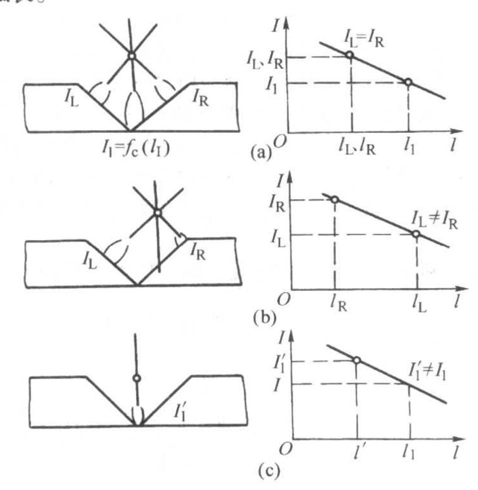


图 5.2-7　电弧传感器工作原理

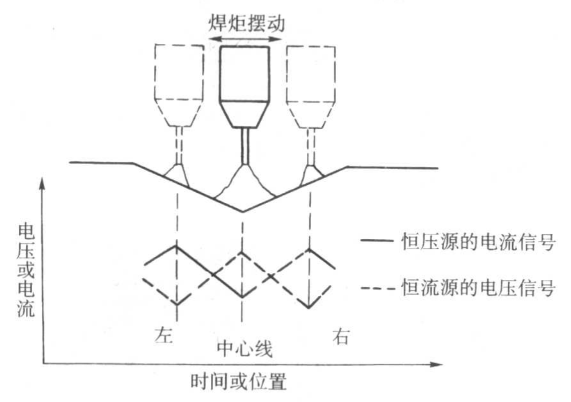


图 5.2-8　不同电源特性下电弧传感器工作原理

(3) 视觉传感器

视觉传感能获得类似人眼的二维或准三维的信息，它在弧焊机器人焊前的工件焊缝空间位姿和几何形状的确定、焊接过程中焊缝轨迹和焊接参数的实时监控、熔池表面及附近温度场的检测、熔滴过渡过程与熔透信息分析、焊后焊缝表面质量的评定等方面都已有众多的应用。

在焊接过程中，由于存在弧光、电弧热、飞溅以及烟雾等多种强烈的干扰，在不同的使用条件下需选择不同的视觉传感方法。根据使用的照明光不同，可以把视觉传感方法分为“被动视觉”和“主动视觉”两类。“被动视觉”是指利用弧光或普通光源与摄像机组成的传感系统；而“主动视觉”一般是指使用具有特定结构的光源与摄像机组成的传感系统。视觉传感器的功能是把光学图像转换成电信号，即把入射到传感器光敏面上按空间分布的光强信息（可见光、激光、X 射线、红外线、紫外线或电子轰击等）转换为视频信号，而该视频信号能再现入射的光辐射图像，最终从光辐射图像中获得所需的信息。视觉传感具有信息量丰富、灵敏度和测量精度高、抗电磁场干扰能力强、与工件无接触等优点，适用于较多的坡口形状，可以同时进行焊缝跟踪和焊接质量的监控。其缺点是作为附加式传感器会影响焊接执行机构的可达性，成本也比较高。从目前工业化应用的普适性角度，基于激光结构光的传感技术发展较快，它不仅可以用于焊缝的跟踪，而且可以用于坡口形状、宽度和截面等的检测，为焊接参数的在线规划及自适应控制提供必要的信息。

激光结构光传感器及其原理如图 5.2-9 所示。由激光管发出点光源经一柱状镜转换成条形光，投射到工件表面的 V 形坡口、角接或搭接焊缝上，发生相应的变形，并向工件上方反射。由一 CCD 摄像器件接收从工件上反射的反映焊缝形式的条形光，通过信号采集与图像处理环节，便可知条形光变形处的中心位置，即焊缝中心线的位置。若将光源安装到焊接机头上，在开始焊接前让条形光的中心位置对应于焊炬的中心位置，则可根据 CCD 接收到的变形条形光反映的中点位置与焊炬位置的关系，获得焊炬与焊缝中心线的偏离方向及偏移量大小的信息。结构光法适合于不同的焊缝和各种焊接方法，随着图像处理技术的发展，处理的实时性已能满足大多数工业化使用的需求。结构光视觉方法由于所采用的照射系统的不同可划分为点结构光法、线结构光法、多线结构光法和网格结构光法等。

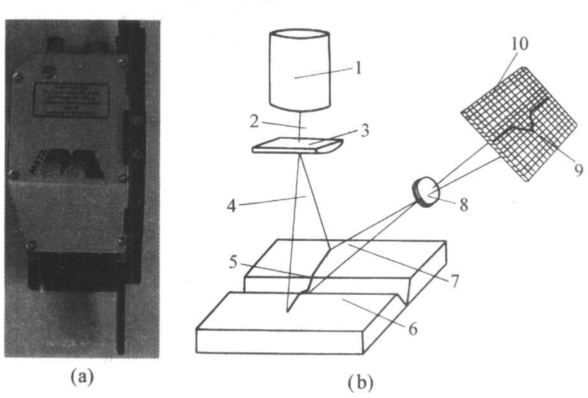


图 5.2-9　激光结构光传感器（a）**及其原理**（b）

1—激光器；2—发射光束；3—柱面透镜；
4—结构光束；5—扫描线；6—工件；7—反射光束；
8—成像透镜；9—检测的轮廓；10—CCD 摄像机

(4) 其他用于焊缝跟踪的非接触式传感器

其他用于焊缝跟踪的非接触式传感器主要有：超声波式传感器、电磁式传感器、红外传感器、光电数字传感器等。图 5.2-10 和图 5.2-11 分别为超声波式传感器和电磁式传感器工作原理。

将超声波用于对焊缝位置传感是根据发射出的超声波在金属介质中传播的特性，利用界面产生反射波的原理制成的。对反射回来的超声波信号，通过计算得到跟踪控制参量。用超声波传感器进行焊缝跟踪的实时性好，对强弧光、强电场、强磁场、烟雾等的干扰不敏感，同时具有体积小、经久耐用、价格低廉等特点，并能应用于水下湿法焊接的场合。但是由于传感器要贴近工件，不可避免地会受到焊接方法和工件尺寸等的限制。另外需要考虑外界振动、传播时间及噪声等因素，对金属表面状况要求较高。超声波传感系统对焊缝跟踪的精度一般为 0.5 mm。随着各种控制理论的发展，超声波传感器及其应用将会得到进一步的发展和完善。

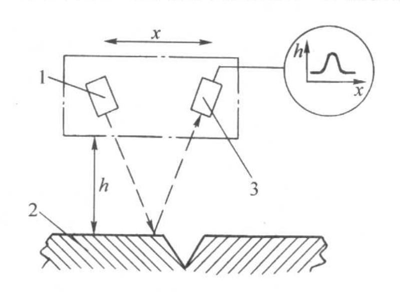


图 5.2-10　超声波位置传感器原理图

1—发射器；2—工件；3—接收器
x—传感器水平位移变量；h—传感器高度位移变量



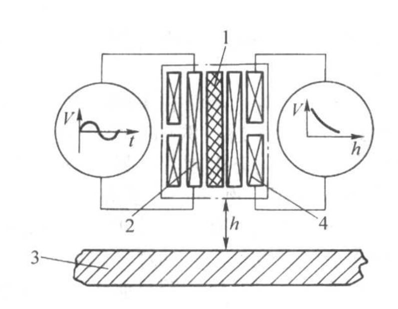


图 5.2-11 电磁感应式传感器原理图

1—铁心；2—激磁绕组；3—工件；4—探测绕组；

h—传感器高度位移变量

电磁式传感器通常用于检测工件的位置或位移信息（见图 5.2-11），一般分为两种类型，即电容式和感应式。电容位移测量原理的基础是由理想平板电容构成。两个平板电极是由传感器电极和相对应的被测体组成。当恒定的交流电压加在传感器电容上，传感器产生的交流电压与电容电极之间的距离成正比。交流电压经检波器，与一个可设置的补偿电压叠加，经放大，作为模拟信号输出。电容式传感器的信号易受工件表面平整状态的影响，较少用于焊接过程，而在热切割过程的割炬高度的控制中有所应用。

电涡流式传感器是近年来发展较快且应用较多的一种非接触传感器，其原理是基于工件材料与交变磁场的相互作用。传感器在近工件的表面产生涡流电，其量值取决于传感器与工件之间的距离，并影响传感器探测线圈的感应系数，从而可获得与所测距离有关的电量信号。根据涡流的频率，传感器对于不同工件材料的电磁特性有两种不同的作用方法。一种是低频涡流传感器，只适合用于铁磁材料；另一种是高频涡流传感器，对铁磁和非铁磁材料都适用。一般地，电涡流式传感器对偏差的调整精度为 ±（0.15 ~ 0.5）mm，在对接接头的间隙宽度为 0.05 mm 时就能有效实现对焊缝的跟踪。但需要注意外来磁场的干扰以及邻近铁磁物质对传感器的影响，如夹具的形状、点固焊缝、工件厚度的变化等。

电磁式传感器的一组线圈只能检测一个方向，如对焊枪高度的监测和调整。当需要对多个方向进行检测时即采用多组线圈的组合方法，例如同时检测待焊坡口的位置和方向、焊枪的高度和角度等，但在结构的设计上提出紧凑的要求。

2.1.5 电弧光谱信息的传感

焊接电弧过程的一个基本特征是具有显著的“电极效应”。即电极既是产热机构，又可以是填充材料或熔池金属。同时，构成电弧气氛的不仅是保护气体成分，而且还包括了电极材料产生的金属蒸气。在电弧的高温条件下，电弧气氛中的各种粒子处于受激发的状态，电子在不同能级间的跃迁中，发射出光量子，使电弧成为一个辐射光源。根据电子跃迁的不同形式，主要存在轫致辐射、复合辐射和激发辐射等三种辐射类型。前两种是由电子的自由 - 自由跃迁和电子的自由 - 束缚跃迁而产生的，由于自由电子能量的任意性，得到的是连续光谱并在电弧的弧柱中同时出现，能观测到的是这两者之和；后一种辐射是由处于激发态的原子中的束缚电子从较高的能级向较低的能级跃迁所产生，电子在这种束缚 - 束缚跃迁中的辐射具有确定的能量，得到的是在某一频率（或波长）的线光谱，其中包含了关于构成电弧组分的粒子温度及其数密度等的物理信息。

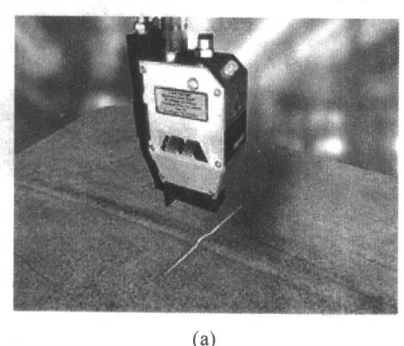
在电弧光谱信息传感技术的工业应用中，目前较多的是通过对电弧辐射光所选波长的谱线强度的检测与分析，从而获取弧焊过程及其质量信息与特征的一种方法。这一方法已在一些重要产品的焊接过程中得到有效应用，如对氢致裂纹敏感性强的钢种的焊接过程中，通过检测电弧光谱中氢谱线发射光谱的强度（如 H_α、H_β 等）实现电弧气氛中氢浓度的监测。类似地，在钛或钛合金的焊接过程中，对电弧气氛中氧的浓度进行监测，从而确保钛合金焊缝的性能。另外，光谱信息传感技术还可以用于监测电弧中来自母材元素的线光谱强度来控制表面熔敷时熔敷层的稀释率；通过监测连续光谱的强度获取激光焊接中光束与被焊材料的相互作用导致的等离子体的电子数密度信息等。

电弧的光谱信息传感方式是通过分光仪器如单色仪、光栅光谱仪、光学薄膜元件、干涉仪、干涉滤光片等实现的。对传感器的小型化以及光谱时、空分辨率的提高是该种信息检测技术在工业化应用与推广中的关键。

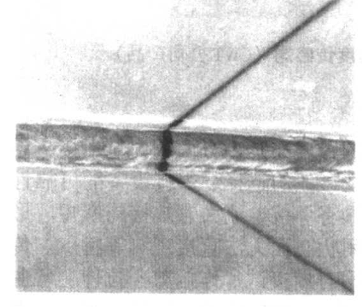
2.1.6 焊缝的几何尺寸

目前大都采用机器视觉或基于激光结构光的传感方法对焊缝的图像或特征信息进行采集（如图 5.2-12 所示），然后采用计算机图像处理技术提取并计算焊缝的特征值如焊脚长度、焊缝厚度、焊缝凹凸度、焊趾角度、焊趾半径等，以及接头特征如间隙、定位焊缝、工件倾角等。另外还有如裂纹、咬边、气孔等的表面缺欠及焊缝成形的不均匀性等。

焊缝的熔深对焊接结构的承载或受力有重要的影响。熔深不足或熔深过度均是要求避免的。对熔深的检测是为了确保充分的熔化或焊缝根部的余高，同时防止出现焊穿缺陷。在钨极氩弧焊中，采用背光传感或超声波传感能够对熔深状况进行监测和判断；机器视觉、熔池振荡传感等亦能够获得关于焊缝熔池尺寸、形状和深度的信息。表 5.2-5 列出了部分焊缝检测的内容及其典型技术指标。



(a)



(b)

图 5.2-12 基于激光结构光的焊缝外观检测（a）**以及对焊缝图像信息的获取**（b）

2.1.7 用于焊接过程监测的其他传感器

近年来，传感器技术的发展和工业化应用水平的提高对焊接过程各个工艺参数信息的在线监测提供了有利的条件。图 5.2-13 是用于气体流量监测的质量流量计，监控精度为 ±0.5%，流量计带有模拟量和数字量接口，用于流量信息的实时获取。图 5.2-14 是用于监测焊接行走机构速度的传感器，测量范围 0.4 ~ 42 mm/s，测量精度为 ±3%。图 5.2-15 是用于监测送丝速度的传感器，测量范围 4.2 ~ 420 mm/s，测量精度为 ±3%。



表 5.2-5　焊缝外观检测及其指标

焊缝检测	典型指标（t 为板厚）
焊脚长度	$>0.9t$
焊缝厚度	$>0.6t$
熔深	$>0.2t$
定位焊缝	<6 mm
气孔	最大直径<1.6 mm
咬边	$<0.1t$
焊穿	不允许
裂纹	不允许

注：数据取自 AWS D8.10M-2003 及 ISO 标准。

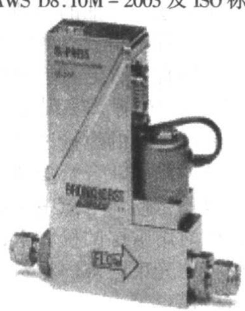


图 5.2-13　气体质量流量计（Bronkhorst 公司产品）

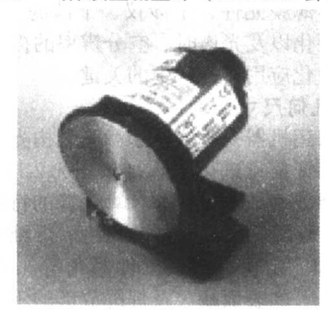


图 5.2-14　焊接速度传感器（CWT 公司产品）

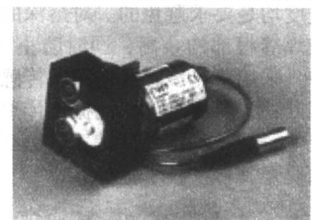


图 5.2-15　送丝速度传感器（CWT 公司产品）

2.2　电阻焊信息的传感

影响电阻焊接头质量的因素亦是多方面的，包括接头设计、材料性能、焊接工艺及参数的选择、焊接设备的可靠性与稳定性等。电阻焊过程具有焊接电流大、焊接周期短、形核过程迅速且熔核处于封闭状态而无法直接观测等特点。传统的焊接质量检验大都采用对焊接试片作拉剪、拉伸、弯曲等检验（即焊后对焊件进行破坏性抽样检验）的结果来代表某一批产品的焊接质量。这种方法不但浪费大量的人力和物力，而且也难以满足现代工业发展对点焊质量提出的一致性、可靠性和低成本的要求。电阻焊过程可监测的信息很多，如：电流、电压、能量、动态电阻、电极压力、电极位移、声发射、红外辐射等。对于不同的电阻焊工艺与条件，获取与其质量有明确物理意义和对应关系的特征信息是实现在线监测的关键。本节以电阻点焊为例，介绍电阻焊过程的信息传感。

在点焊过程中，与焊点质量相关的信息可分为两类：一类是对焊接参数的信息传感，例如有焊接电流、焊接时间、电极力、电极间电压、动态电阻等；另一类是对与熔核形成有关物理量的信息传感。例如，由于焊接过程电阻热的作用，金属经历加热、熔化、凝固以及相变，因此存在能反映被焊金属加热程度的温度信息，如红外辐射；金属受热会膨胀，焊接区出现液态金属时体积明显胀大，出现电极位移的信息；金属相变和变形时，会产生声发射的信息；熔核形成过程中的固相和液相转变，对超声波吸收及反射会有不同的特性反应等。上述各种信息都是与熔核焊点质量之间有直接或间接的关系，表 5.2-6 列出了其中一些主要的可传感的信息，并进一步说明其原理和实施方法。

表 5.2-6　电阻焊过程的信息传感

变　量	监　测	控　制
电 流	√	√
电 压	√	√
电极间压力	√	√
焊接时间	√	√
电极位移	√	
动态电阻	√	
冷却水温度	√	

1）焊接电流是十分重要的信息，熔核直径与焊接电流有效值存在较密切的关系已在实践中得到证明，但与电流峰值并无直接的关系，恒流控制法便是利用这一信息来实现的。通过测量一次或二次回路的电流有效值，并与给定的电流值相比较，当出现偏差时，调节晶闸管的导通角来保证焊接电流的稳定。用于电流监测的传感器通常有两类：一种是软带式传感器，又称为 Rogowsiki 型线圈（如图 5.2-16），用于对输出端电极处的电流值的传感；另一种是采用互感器或霍尔元件对焊接变压器初级或次级电流的采样（其工作原理与用于弧焊过程检测的相同），然后用计算的方法获得焊接电流的峰值、有效值等。

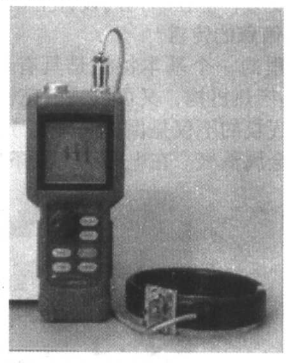


图 5.2-16　软带式电流传感器（日本 Miyachi 产品）

软带式电流传感器是根据电磁感应定律，电场周围线圈中感应电动势与线圈中的磁通变化律成正比，电动势 e 的方向阻碍磁通变化，即：

$$e=-N\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} \tag{5.2-1}$$

式中，N 为线圈总匝数；

$$\varphi=BS \tag{5.2-2}$$

式中，S 为传感器横截面积；磁通密度 B 和磁场强度 H 取决于磁通所在材料

$$B=\mu\mu_0 H \tag{5.2-3}$$



式中，$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-9}$ H/cm 为真空中的导磁系数；μ 为相对导磁系数，在真空中为 1。

根据全电流定律，在真空内的磁场中，磁场强度沿任意闭合回路积分等于该闭合回路所包围的电流的代数和（假设传感器为圆形，平均半径为 R），则：

$$\oint H\mathrm{d}l = \sum i \text{，其中：} i = 2\pi RH \text{，有：}$$

$$e = -\frac{\mu_0 NS\mathrm{d}i}{2\pi R\mathrm{d}t} = -M\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{5.2-4}$$

式（5.2-4）表明传感器线圈中所产生的电动势或电压信号和点焊电流的变化率呈线性关系。由式（5.2-4）可以看出，M 是与传感器线圈结构有关的常数，线圈平均半径越小，横截面积越大，匝数越多，所获得的信号越强。该种传感器对电流的种类、大小、频率等没有限制，可根据设备与工艺的具体情况自行设计和制作。

2）电极间压力对焊点质量影响较大，并与焊点质量之间存在一定的规律性，因此，电极间压力可以作为焊点质量的监控信息。当电极间压力是用气阀或液压阀来调节时，电极间压力信息较难获取。近年来发展的一种石英应变压力传感器（如图 5.2-17 所示），具有灵敏高、易安装、不需要改动设备结构、动态响应快等特点。它是利用石英晶体的纵向压电效应，将“力”转换成”电荷”并通过放大器转换成电压，可以测量动态力、准静态力和冲击力。

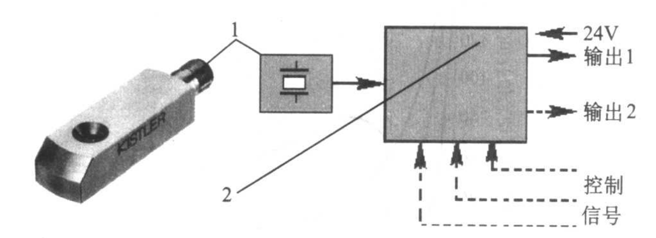


图 5.2-17 石英应变压力传感器（1）及其电荷放大器（2）（KISTLER 公司产品）

当电极移动是采用伺服电机控制时，电极的位置和扭矩都可精确设定，对于电极间压力的监控以及焊点热膨胀力信息的监测都十分有利。

3）在点焊过程中由于金属受到局部加热，在一定范围内熔化金属的多少与电极位移的大小成正比关系，称为电极位移检测或热膨胀法。这是一种有效的焊点质量在线监测手段。它是利用点焊过程中金属固 - 液态的转变、熔核形成、长大时膨胀产生的位移与熔核尺寸有一定的对应关系来进行监控的。如图 5.2-18 所示，在对每半个周波的电极间力的监测中，均能获取关于熔核形成和长大过程中的热膨胀力的信息。在生产现场的监测中，主要采用电涡流位移传感器或电感差动变压器式的位移变送器来测量这一膨胀力。

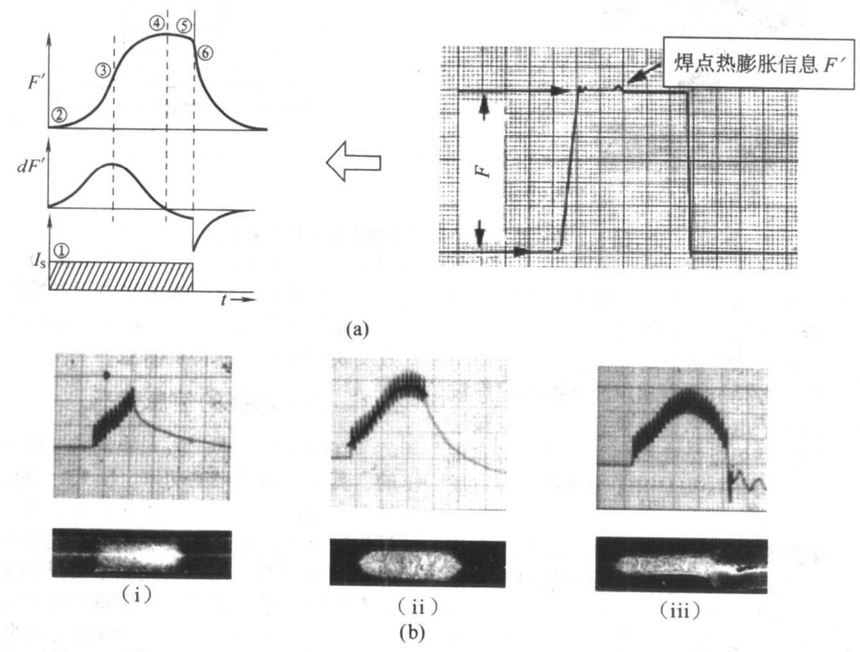


图 5.2-18 焊点熔核形成和长大过程中热膨胀力的信息（a）**及其与焊点质量的关系**（b）

（a）1—电流 I_s 通过焊点；2—焊点开始热膨胀；3—热膨胀速率达到最大点；4—热膨胀力达到最大，此时膨胀力的变化率 dF'为零；5、6—焊点收缩，热膨胀力下降

（b） i—热膨胀力 F'信息出现；ii—热膨胀力达到最大，焊点开始收缩；iii—由于继续通电而导致飞溅

4）动态电阻即焊点通电加热与冷却过程中电阻值变化的情况。电阻焊过程的动态电阻可分为两类：第一类是以低碳钢为代表的电阻值随焊接时间的变化曲线（如图 5.2-19 中的曲线 I），例如低合金钢、钛合金等都具有这种类型的动态电阻曲线；第二类是以铝为代表的电阻值随焊接时间的变化曲线（如图 5.2-19 中的曲线 II），这类材料有铝合金、不锈钢等。第一类曲线具有最大值的特征，且最大值的出现与焊点熔核的形成有对应关系。当电阻达到最大值后，焊接区（电流通道上）的平均温度几乎达到一个恒定值，此时电阻仅是焊接电流通道面积的函数，即动态电阻与电流通道面积的倒数成正比。因此，当测出某一动态电阻曲线的特征参数（如最大电阻值、电阻曲线包围的面积等），则可推定熔核的大小。动态电阻的计算式可表达为：$r_m = v_m/i_m$。式中，r_m 为焊点的瞬时电阻；v_m 为焊点的瞬时电压；i_m 为瞬时焊接电流。在实际在线监测时，对于周期信号，一般取焊接电流的半个周波为单位，将 v_m 定义为两电极间半周的峰值电压；i_m 定义为半周中的电流有效值；r_m 为每半周达到峰值的电阻。对于非周期信号，通过对 v_m 和 i_m 作一定统计时长的积分，求出该时间间隔的电阻值，即 $\Delta r_m = \Delta v_m/\Delta i_m$。

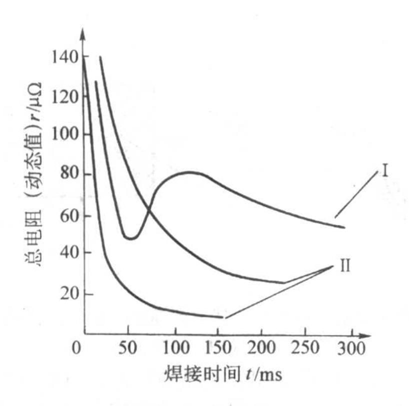


图 5.2-19　金属点焊时的动态电阻曲线

对第二类电阻曲线，其特征是在点焊初期随着接触电阻的消失，电阻值迅速下降，然后电阻值几乎保持不变，不具有反映熔核尺寸变化的信息。因此，具有这一电阻特征曲线的材料不宜采用电阻监控方法监测焊点质量。

当生产条件一定，散热量基本一致时，对输入焊接区的能量，即焊接电流与电极间电压的乘积进行监控，亦是一种监测焊点质量信息的有效手段。对点焊过程能量的监测通常有两种形式。一是采用电流对时间的积分，即 $\int_0^t i^2 \mathrm{d}t$，它适用于电流和焊接时间有关的场合，且在焊接区电阻基本为常量的条件下方能成立，因此，对铝合金及不锈钢的点焊较为适用；二是电流和电压对时间的积分，即 $\int_0^t iu\mathrm{d}t$，式中的电极间电压随着金属在焊接过程中加热、熔化、凝固而变化，在一定程度上反映了熔核的形成过程，它对碳钢、合金结构钢、钛合金等的点焊质量监控都较适用。

5）点焊质量信息的超声波监测技术是利用超声波在界面反射或穿透焊点熔核时的声波衰减程度来实现焊点质量的判断。图 5.2-20 所示为用超声波监测焊点质量状况示意图。

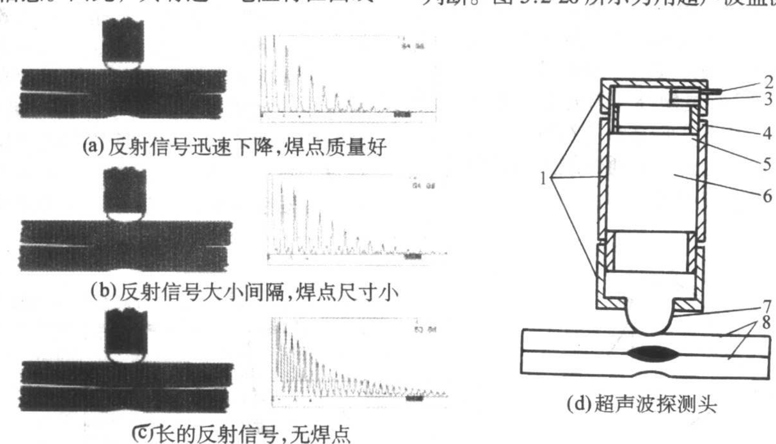


图 5.2-20　超声波监测焊点质量状况的示意图

1—外壳；2—信号插座；3—连接电缆；4—阻尼件；5—压电晶片；6—缓冲通道；7—外隔膜；8—钢板

超声波传感器有单探头和双探头两种。前者利用回波传播时间效应使用一个既能作为发射极又能作为接收极的高频超导波转换器，通过对超声波脉冲传播时间的计算，获得与焊点质量相关的信息；而后者是把产生超声波和接收超声波的压电元件整合到点焊的上下电极中，接收到的超声波被转化为电信号。将信号分析的结果反馈到控制器，从而可实现焊点质量的在线监控。该方法在高强度钢和镀锌板的焊点质量监测中已获得较满意的结果。

6）声发射与红外信息技术　金属在融化、相变时和焊接缺陷生成过程中都会产生声发射。监控声发射的强度可以度量熔核的大小和产生缺陷的状况，因此也是一个与焊点质量有关的信息源。但是声发射的强度很微弱，易受电磁干扰，甚至被环境噪声所淹没。此外点焊声发射的频谱正处在空气中各种高频干扰范围内，目前在实际应用中采用声发射技术监控点焊过程的裂纹和飞溅是成功的，但监控熔核尺寸尚在试验阶段。

焊点的温度最能反映焊点受热以至熔化的实际情况，红外辐射的能量密度与温度近似成4次方的函数关系，因此在理论上可作为焊点质量监控的信息源之一。但是要测量熔核内部的温度，在技术上目前仍存在很多困难。测量焊点的表面温度受诸多方面因素的影响和干扰，如传热条件、表面状态、电极大小等，使所测的表面温度波动较大。

在实际焊接生产中，由于点焊时所使用的材料、设备及工艺等的不同，所采用的监测方法也应该随之调整。例如，在低碳钢点焊时可以对动态电阻进行监测，而铝合金点焊时这一方法就不适用了；在使用交流点焊机焊接时采用的监测方法，在直流点焊机焊接时由于参数波形以及工艺参数都会有所不同。因此，必须正确地选择传感方式，从而获取能有效反映焊接质量的特征信息。

2.3　激光焊接的信息传感

在激光焊接中，激光能量向工件的传输信息是最为关注的，其中包括光束的功率、模式、与材料的相互作用、聚焦位置、脉冲参数以及焊接速度等。表 5.2-7 列出了激光焊接过程的有关信息及已能实现的工艺参数的监控。其中，对激光束与材料相互作用的监测主要是基于对焊接区光致等离子体在红外或紫外光谱辐射信息的分析技术。

表 5.2-7　激光焊接过程的信息传感

变　量	监　测	控　制
激光功率	√	√
激光 - 材料反应	√	√
光束模式	√	√
脉冲参数	√	√
时间	√	√
焊接速度	√	√
温度	√	
保护气体流量	√	
聚焦位置	√	√



对光束模式的监测主要用于确定 CO_2 激光束截面能量的定量分布，从而进一步评价激光器系统的运行状况和性能。根据检测的模式图像可获得光束直径、能量分布、光束的准直及扩展等信息。常用的传感器有扫描线、旋转滚筒或空间能量探测阵列等。对激光光束聚焦位置信息的传感方法类似于弧焊过程焊枪与工件距离的保持，例如采用机械接触式、电容式、感应式传感器等。同样，对弧焊过程焊缝跟踪所用的传感器大都均可沿用到激光焊接的场合。例如，对于直缝焊接，当焊接速度达 6 m/min 时采用接触式传感器已能实现对 ±7.5 mm 范围的跟踪精度为 ±0.1 mm。但需要注意的是，用于激光焊接的焊缝跟踪传感器较之于弧焊焊缝的跟踪，要求有更高的灵敏度和分辨率。

声发射传感技术在激光焊接的熔深监测中具有成功的应用。当焊接接头从局部熔透变为完全熔透时，由于热应力作用使工件的声发射频率及其波形有显著变化，并与焊缝的熔深具有对应的关系，由此实现对焊接过程熔深的监测和控制。

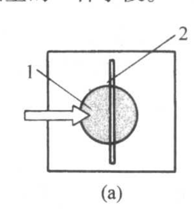
2.4　电子束焊接的信息传感

为了保证电子束焊接过程的高度稳定性和焊接质量的一致性，表 5.2-8 列出了电子束焊过程所必须监测的参数信息。这些信息一方面可作为焊接质量监测的记录，另一方面是作为对工艺参数优化和设备维护的依据。新型的电子束装置具有对电子束截面自动扫描和信息处理的自诊断功能，通过检测电子束的空间几何特征来保证焊接过程及质量的可重复性。

表 5.2-8　电子束焊过程的信息传感

变　量	监　测	控　制
束电压	√	√
束电流	√	√
聚焦	√	√
束偏转	√	√
束脉冲	√	√
时向	√	√
焊接速度	√	√

对电子束截面的检测通常采用狭缝式和针孔式的数码扫描传感器（如图 5.2-21 所示），扫描获得的信息通过计算机计算出该截面上的能量密度特征。图 5.2-22 所示的是当电子束聚焦平面出现微小的上下变化时，对束能量密度分布的影响。另外，不同的束偏转模式对焊缝表面成形的影响如图 5.2-23 所示，利用束偏转运动对熔池的搅拌作用成为提高焊缝质量的一种手段。



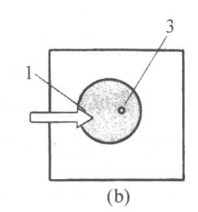


图 5.2-21　电子束截面特征信息的传感狭缝式（a）针孔式（b）
1—电子束；2—狭缝；3—针孔

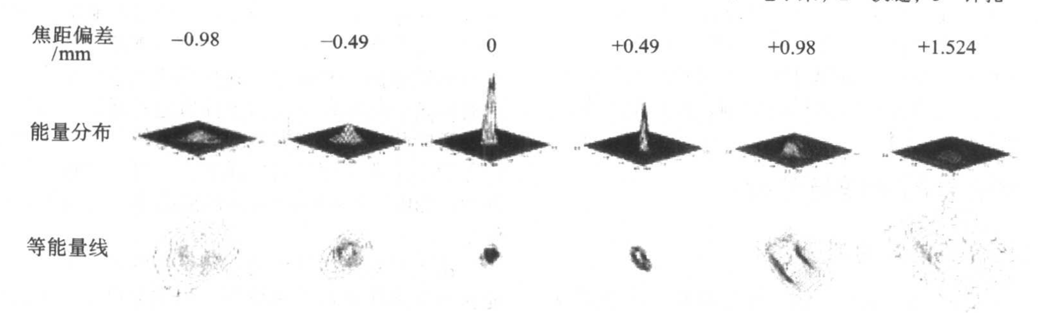


图 5.2-22　电子束聚焦平面的变化对束能量密度分布影响的示意图
（实验条件：150 kV，20 mA，焦距 350 mm）

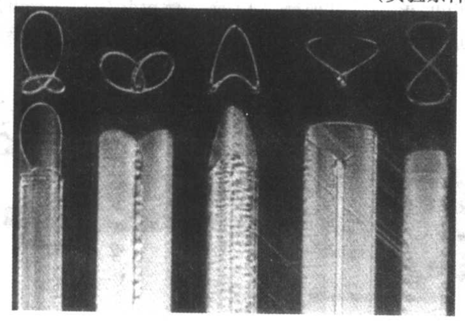


图 5.2-23　不同束偏转模式对焊缝表面影响

在电子束的焊接过程中，电子束的偏转扫描产生的二次电子发射信息可用于对焊缝位置的实时跟踪。基于二次电子发射信息传感（SEES – Secondary Electron Emission Sensing）的焊缝跟踪原理见图 5.2-24。

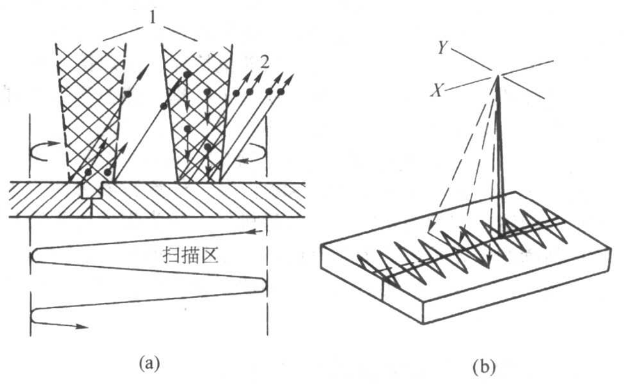


图 5.2-24　基于二次电子发射（a）信息的焊缝跟踪（b）原理图
1—电子束；2—二次电子发射

2.5　摩擦焊的信息传感

摩擦焊是一种利用机械能进行焊接的工艺，其焊接参数一般都是在焊前设定的，全自动化的摩擦焊接装置已得到较普遍的应用。表 5.2-9 列出了直接驱动和惯性摩擦焊的焊接过程中主要的工艺参数信息。例如，在直接驱动的摩擦焊中，重要的变量是旋转速度、轴向力和时间；而在惯性摩擦



焊中，重要的变量是起始旋转速度、转动惯量和轴向压强。常用的传感器有与顶锻气缸连接的具有温度补偿的压力变送器、转速计、电感差动变压器式的位移传感器等。各焊接阶段的时间变量也是摩擦焊接工艺中的一个重要监测量，典型的时间变量有：转轴达到规定速度所需的时间；摩擦阶段的时间；制动时间；顶锻时间以及焊后加压时间等。

表 5.2-9　摩擦焊过程的信息传感

变　量	监　测	控　制
工件速度	√	√
时间	√	√
压强	√	√
力	√	√
位移	√	√
旋转速度	√	√
温度	√	√

近年来搅拌摩擦焊（FSW）得到迅速发展。对其过程及质量监控信息主要包括：主轴转速、主轴瞬时输入功率（扭矩）、搅拌头倾角、搅拌头的插入速度、搅拌头的插入深度、搅拌头初始停留时间、搅拌头的初始焊接速度、焊接速度、轴向焊接压力等。新型的搅拌摩擦焊设备对上述各信息的传感与监控均集成在其机械数控系统中。

2.6　钎焊过程的信息传感

钎焊加热有多种方法，如火焰、电弧、电炉、感应圈以及电阻法等。钎焊的工艺过程及特点一般要求对钎焊的温度、时间、气氛（包括真空度）等进行监测。在温度的监测中最常采用的传感器是热电偶，另外有高温计、红外测温仪等。对钎焊气氛的监测包括对惰性气体的质量或可控气氛炉成分的监测，其目的一是确保钎焊过程的气氛始终在工艺规定的范围内；另一是对气氛中氧含量的监测，防止氧对重要钎焊接头的不利影响。

3　焊接过程信息的处理与分析

3.1　焊接过程传感信息的判读

对焊接过程信息传感的目的是为了建立所获信息与焊接接头质量的关系。但在多数情况下，由于焊接过程是一个具有显著时变性的连续过程，对其任一瞬间的信息而言，并不具备明确的物理意义，因此，关于焊接质量信息的内容应是在一定的统计时长内，对过程的特征和规律观测、提取和分析的结果。同时，由于焊接过程的随机特征，使焊接过程不具有确定的函数表达形式，从而使基于物理、热力学等原理的数值模拟及系统辨识等建模方法难以适用。因此，基于过程信息时、频域的统计特征分析（如基于时间序列分析的ARMA模型）、统计过程控制（SPC）以及计算智能方法（人工神经网络、模糊逻辑、支持向量机等）成为焊接过程质量信息判读的主要手段，近年来已积累了较多的成功经验和应用实例，也是今后焊接过程信息判读以及多信息融合技术发展的一个必然方向。

3.2　工业化的焊接质量监测系统

焊接信息化技术的发展来源于焊接制造由经验性向科学性提升的迫切需求，其最终目的是工业化的应用。随着微电子技术及计算机软硬件技术的高速发展，实时在线地对大量监测信息的采集、处理、分析、存储以及传递成为可能。目前国内外已有多种产品化的焊接质量监测系统。由德国汉诺威大学在20世纪70年代末开发的“汉诺威分析仪”（ANALYSATOR HANNOVER），是进行焊接过程信息分析与焊接质量信息化评估的有效工具之一。该仪器以弧焊过程的电参数为信息源，以概率密度统计分析为主要手段，实现了对焊接过程信息大数据量的压缩，对焊接过程的稳定性、飞溅、焊接缺陷（如焊穿）等在电参数的特征上能做出具有明确物理意义的解释。并通过对焊接过程稳定性及各统计分布的判断进而作出焊接质量的评价。这一方法分别在材料（焊条，实芯、药芯焊丝等）、设备（焊接电源）、工艺（参数优化）等方面都获得了较好的质量监测与分析效果。对焊接材料的成分与配方的改进，对焊接电源控制线路中缺欠和故障的诊断以及对复杂焊接工艺过程多参数的快速择优均有重要的指导作用。

Computer Weld Technology Inc.（CWT）公司的ADM焊接过程监测仪，可实时采集电流、电压、送丝速度、焊接速度、保护气流、温度并计算热输入，当过程出现故障、参数超出设定阈值时进行报警。该监测仪还可与ADMSTAT Plus软件配套使用，实现数据的同步显示与分析。美国IMPACT Engineering Inc公司的ARCAgent便携式弧焊过程监测系统可监测焊接电流、电压及送丝速度、保护气流量，以及实时进行焊接质量相关信息的分析。该系统采用嵌入式DSP对信号进行分析，可提供热输入、熔敷率、过渡模式、短路频率、脉冲与脉宽、电弧稳定性等信息。与ARClient软件配套可实现过程监测、SPC、产品跟踪、数据存储、故障报警等。该系统还可实现基于网络的多节点的监测与分析。类似的还有英国DH公司的MonArc；澳大利亚WTI公司的WeldPrint等。图5.2-25为美国WTC/MEDAR公司的用于电阻点焊过程的监控系统示意，其中“蓝牙”技术已应用于数据的无线传输。

另外，随着计算机及电子技术的发展，焊接过程信息的获取方式亦得到了不断的改进。用微控制器构建数据采集的终端，每个终端对应并控制一个传感器，独立进行数据的采集与本地存储，并通过公共数据线把它们组成一个网络，最后通过统一的接口电路与主控机进行通信。这种基于微控制器的智能化终端架构的数据采集系统具有抗干扰能力强、应用方便、工业化程度高、成本低、可扩展性强等优点，能达到500 KB/s～2 MB/s的信息传输速率，适合焊接生产现场的使用。

由上述众多产品化的监测系统的特点可见，虽然目前工业化的焊接质量监测系统很大程度上仍处于对过程参数的监测，但对于质量信息的解读、焊接缺欠与缺陷的识别也已取得了实质性的进展。尤其是现代制造过程对焊接加工不断提出了“可记录”、“可追溯”以及“精量化生产”等的迫切需求，促进了焊接过程及其质量信息化装备的产品化和工业化的推广应用。

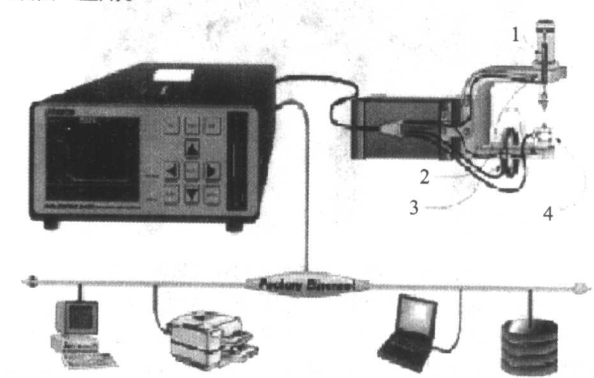


图 5.2-25　一种网络化的点焊质量监控系统示意

1—位移传感器；2—电压传感器；3—电流传感器；4—压力传感器

编写：宋永伦（北京工业大学）



第3章　焊接过程质量自动控制技术

随着冶金、机械、电力、原子能和航天、航空、激光等现代化技术的高速发展，作为材料加工的重要手段之一的焊接技术正向着自动化、智能化方向发展。作为一种加工方法而言，当然以产品质量为最终的评价标准。但是用什么指标及如何衡量焊接结果，以及为了达到所需的技术要求，在加工之前应提供哪些焊接条件，在加工过程之中应该对哪几种规范参数进行控制等，则是保证焊接质量甚至还可能影响到焊接工艺能否进行的基本问题。

焊接过程是一个光、电、热、力等综合作用下的复杂的物理化学过程，其中对应地存在各种信息，分别以光、电、磁、声等不同的信号形式反映出来。根据关心的程度或希望控制的对象的不同，所侧重的焊接信息也不同。以弧焊过程为例，焊接信息大致分为三类：一类是焊接工艺信息，包含接头形式、装配尺寸、焊接电流、电弧电压、焊接速度等；一类是焊接过程信息，包括电弧形态、熔滴过渡、熔池形状、焊缝对中、温度分布等；第三类是焊接质量信息，包括焊缝成形、气孔直径、裂纹长度、熔透程度等。

焊接过程信息可通过传感器来检测。目前焊接信息传感器的检测范围有：工件接头的位置、坡口的形状、有无障碍物和定位等构件状态，焊丝干伸长、电弧和熔池状态、焊道外观等焊接固有特性和状况。通常传感器检测结果输出给计算机等信号处理单元。

现代科学技术进步和焊接科技人员在学科交叉应用方面地不断努力，采用众多的手段和方法，充分利用焊接过程中的光、声、电磁、热、机械等信息，开发了基于机械、机电、电磁、电容、超声、红外、光电、激光、视觉、电弧、光谱等多种形式的传感设备。

根据传感器所面向的对象的不同，表5.3-1列举了一些常用的焊接信息传感器。

表5.3-1　常用的焊接信息传感器

类别	传感物理量	反映信息量	主要应用范围
机械	空间位置	接头位置	焊缝跟踪
图像	空间位置、尺寸	接头位置、熔池尺寸	焊缝跟踪、焊缝成形控制
电场	电弧电流、电压	接头位置、电弧状态	焊缝跟踪、电弧参数控制、焊缝成形控制
磁场	涡流、磁场强度	接头位置、电弧形态	焊缝跟踪、焊缝成形控制
光学	光波反射、透射	熔滴形态、熔池状态	熔滴、焊缝成形控制
热像	温度辐射、梯度	熔池形状、温度分布	焊缝成形、热循环控制
声音	声波发射、反射	接头位置、内在缺陷	焊缝跟踪、无损探伤等

而根据使用目的不同，焊接信息传感器又可以分为以下三类。

1）第一类传感器主要用于检测构件位置、坡口位置或焊缝中心线位置以达到焊缝位置自动跟踪的目的，通常称为焊缝自动跟踪传感器。它约占焊接信息传感器使用总量的80%。

2）第二类传感器主要在焊接过程中实时检测焊接条件的变化以实时自动控制焊接工艺参数来适应每一时刻的焊接状况，称为焊接条件实时跟踪传感器。如利用结构光或激光扫描手段，检测出坡口的宽度、深度及面积等，用以控制焊接电流及焊接速度以获得均匀的焊道；利用视觉系统直接拍摄焊接电弧及熔池，实时控制熔池的宽度以有效地控制熔深甚至熔透；通过光电或声控传感器控制熔透及背面焊缝成形，实现单面焊双面成形。此类传感器通常较为复杂、成本也较高，其控制一般要通过计算机来实现。它约占焊接信息传感器使用总量的10%。

3）第三类传感器可以同时完成上述两项功能，它约占焊接信息传感器使用总量的10%。

焊接工艺的宏观质量控制通常是根据专家系统，严格遵循工艺评定及标准来保证。而施工生产中的过程质量控制则要求对每个瞬时的焊接条件和规范参数进行监控，其中包括接缝装配情况、位置偏差、焊缝成形、熔透程度以及各种焊接缺陷的信息反馈。

因此，在焊接过程中，首先要控制焊接电弧对焊缝的自动跟踪；其次要在焊接过程中检测焊接坡口情况（如宽度、深度、面积等）以及检测焊接熔池的状况（如熔宽、熔深和背面焊道的成形等），以便能实时的调整焊接参数，保证焊接质量；最后，要对焊接最终产品中可能存在的焊接缺陷进行无损检测。

下面分别对保证焊接质量的三个重要环节：焊缝自动跟踪技术、焊缝成形质量控制技术及焊后的无损检测技术加以介绍。

1　焊缝自动跟踪技术

焊缝自动跟踪一般是通过焊缝跟踪系统来实现的。焊缝自动跟踪系统由通常传感器单元、信号处理单元和伺服单元三个部分组成。传感器单元检测到的信息，经处理后用于驱动伺服装置以便对焊接位姿进行适当的调整，实现对焊接过程的自动跟踪。焊缝跟踪系统是一种以电弧（焊炬）相对于焊缝（坡口）中心位置的空间偏差作为被调量，以焊炬位移量作为操作量的闭环控制系统。当电弧相对于焊缝中心位置发生偏差时，传感单元自动检测出这一偏差，输出信号，实时地调整焊炬位姿，使之准确地与焊缝对中。实际生产中经常要求同时进行焊炬左右位置和高低位置的自动跟踪，为此焊炬必须相对于焊接小车有两个自由度，即要有两套随动机构。通常，这两套随动机构是由一个传感单元发出两个方向的跟踪信号来驱动的。

常用的焊缝自动跟踪传感器及其分类如图5.3-1所示。其中的机械接触式传感器、电磁感应式传感器、电容式传感器、气动式传感器、超声波传感器等传统附加式焊缝跟踪传感器，特别是机械接触式传感器较早地得到发展和应用，但是由于其在传感信息量和检测精度方面的不足，1980年以来传统型焊缝跟踪在生产应用中所占的比例呈逐年下降的趋势，而电弧传感器和视觉传感器这两种新型焊缝跟踪传感器所占的比例呈现出逐年增加的态势，成为生产和研究中的两大主流类型（见图5.3-2）。

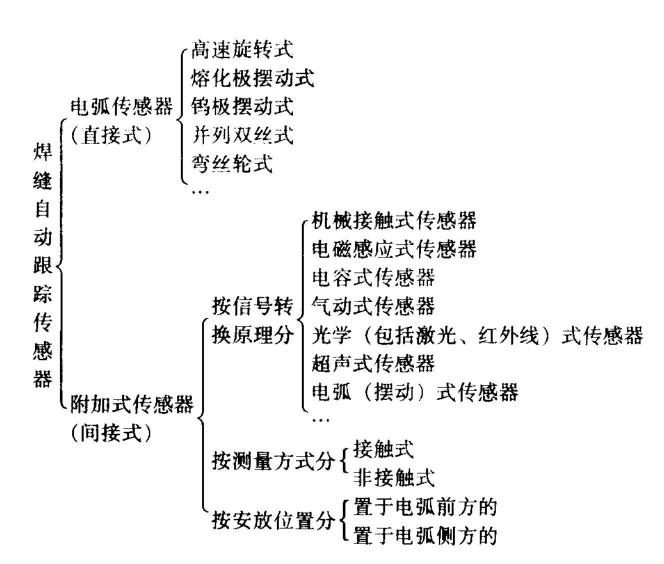


图 5.3-1 常用的焊缝自动跟踪传感器及其分类

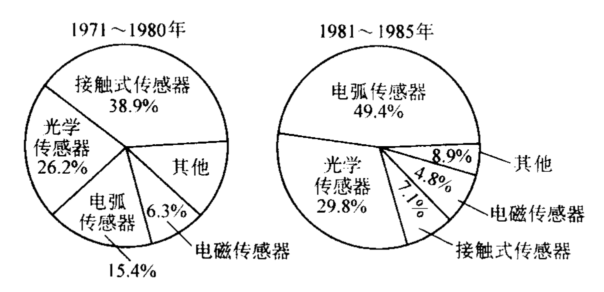


图 5.3-2 日本焊缝跟踪传感器的发展趋势

传统附加式传感器在焊炬上刚性地固定一个附加的机械、电磁或其他装置来检测焊缝位置，其优点在于结构简单、成本较低，其不足之处在于其精度较差、抗磁偏吹和焊丝弯曲扰能力差。一般情况下，传感器所检测到的目标点与实际的电弧中心点之间有一定的距离，这一距离将带来附加跟踪误差，如传感器超前于电弧 50～100 mm，必将导致剧烈曲折焊缝焊接中的跟踪失败。为此需要在系统中采用记忆、延迟、再现方式，有时还需要将传感器和焊炬分别驱动，并用其他传感方式来记录焊炬与传感器之间的偏移量，无疑增加了系统的复杂性。此外传统附加式传感器一般检测的是焊炬与坡口之间的相对位置，并以此代表电弧与坡口的相对位置，无法克服实际焊接中发生的磁偏吹或焊丝弯曲造成的电弧偏离焊炬中心线的情况。

视觉传感器通常采用红外光、可见光、弧光为光源，以点、线、面、体的方式传感焊接区域图像信息。近年来视觉传感器发展很快，已从单纯的焊缝位置检测发展到对包括坡口、电弧、熔池的整体模式识别。视觉传感器具有精度高、再现性好的优点，不仅可以用于焊缝跟踪，而且可以用于检测坡口形状、宽度和截面，为焊接过程信息传感、焊接参数自适应控制、焊接质量信息在线检测与闭环控制提供依据。视觉传感器在使用中不易受到磁偏吹或焊丝弯曲的影响，但需要克服焊接过程中弧光、烟尘、飞溅等干扰。此外，坡口、电弧、熔池等特征的模式识别及其实时性要求，对图像处理的方法、精度和速度都提出了较高的要求。

电弧传感器是利用焊接电弧特性的传感器，与其他形式的传感器相比，具有以下优点：电弧传感器的检测点和焊接位置是一致的，不存在附加式传感器的附加误差；焊接机头不需要装备其他特别的装置，焊枪可达性好；不受焊丝弯曲、磁偏吹及焊接过程中弧光、烟尘、飞溅的影响；价格低廉，可靠耐用。电弧传感器主要从电弧摆动到左右两端取电流信号，通常应用于具有对称坡口的对接、T字接头、厚板搭接等。它适用于等速送丝、水平外特性的电源焊接系统。

传统附加式传感器、视觉传感器和电弧传感器的基本原理及其在焊缝跟踪中的应用等内容将在下面的章节加以介绍。

1.1 传统附加式传感器及其在焊缝跟踪中的应用

1.1.1 机械接触式传感器及其应用

典型的机械接触式传感器如图 5.3-3 所示，它依靠在焊缝坡口中滑动或滚动的探头（导杆或导轮）的运动，将焊炬与焊缝之间的位置偏差反映到检测器内，并利用检测器内的微动开关判断偏差的极性。根据检测器内机－电信号转换方式的不同，可以分为：机械－开关式、机械－差动变压器式、机械－光电式和机械－电磁式等。机械接触式传感器适用于与探头有可靠接触面的 X 形、Y 形坡口窄间隙焊缝及角焊缝，一般应用于长、直焊缝的单层焊和角焊的焊缝跟踪。此方法结构简单，操作方便，在 1980 年以前广泛应用。其不足之处为：对不同形式的坡口需要不同形式的探头、探头的变形和磨损影响检测精度、无法适应焊缝中的点固点和装配间隙、检测精度和焊接速度有限，无法满足高精度、高速度焊缝跟踪要求。

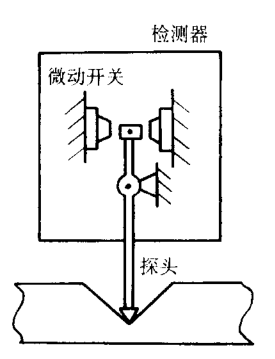


图 5.3-3 机械接触式传感器示意

图 5.3-4 所示为由传感器、控制系统和执行机构组成的机械接触式二维焊缝跟踪系统原理。其中的机械-光电式焊缝跟踪传感器具有传感二维信号的功能：既能传感高度的变化量的大小和方向，也能传感横向的偏移量的大小和方向。以此二维传感信号为反馈量，驱动执行机构的电机带动焊接机头和传感器一同向减小偏差的方向移动，传感器不断地向控制电路反馈调整后的位置信号，直到机头处于正确位置。

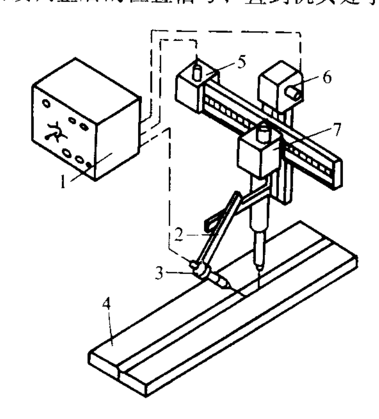
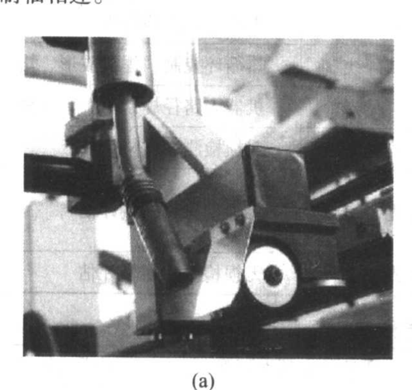


图 5.3-4 机械接触式二维焊缝跟踪系统原理

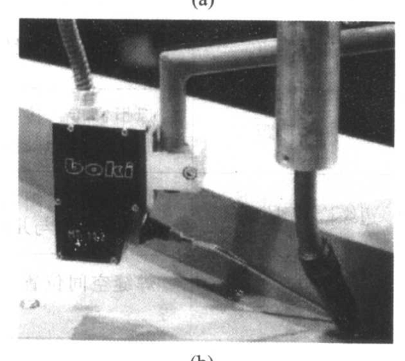
1—控制箱；2—传感器支架；3—探头；4—工件；5—横向调节板；6—高度调节板；7—焊接机头



图 5.3-5 所示为国外某公司的两款机械接触式焊缝跟踪系统。图 5.3-5a 所示为一种机械靠模式焊缝跟踪传感器，该跟踪传感器由一对旋转的铜制导向轮、使焊枪移动的带导轨的十字滑块、重力垂直压力或气动提升力装置、弹簧或气动的侧向压力装置组成，通过铜制导向轮与工件表面的接触，精确保证角焊缝（两个方向的补偿）或保持预制的焊枪与工件表面的距离（一个方向的补偿）。图 5.3-5b 所示为一种探头接触式焊缝跟踪传感器，其探头是可更换的。其几何尺寸为 72 mm × 114 mm × 40 mm、探头长度 100 ~ 150 mm、Y 轴摆动角度 ± 15°、Z 轴摆动角度 ± 15°、检测精度 ± 0.15 mm。焊缝跟踪系统有传感器、控制系统和电动（十字）滑块组成。跟踪传感器传感焊缝位置坐标，由控制系统与焊枪的实际坐标对比，位置偏差（左右和垂直水平方向）根据控制系统指令通过电动滑块进行补偿。主要适用于角焊、搭焊、对焊（最小间距 1 ~ 2 mm）的直线或旋转方式的自动化焊接。该传感器可以独立通过支架与自动焊设备连接，也可以直接与自动化控制轴相连。



(a)



(b)

图 5.3-5　机械接触式焊缝跟踪系统

1.1.2　电磁感应式传感器及其应用

电磁感应式传感器实质上是共用初级线圈的两个变压器，见图 5.3-6。初级线圈两端通以电压 U_1，则在两个次级线圈上产生感应电势 U_{21} 和 U_{22}。当传感器对准焊缝中心线时，两个变压器磁路对称，感应电势 U_{21} 等于 U_{22}。当传感器偏离焊缝中心线时，两个变压器磁路的不对称性，使得 U_{21} 和 U_{22} 有一个偏差信号。该偏差信号可以反映传感器偏离焊缝中心线的大小和方向。

电磁传感器的灵敏度取决于输入电压的大小和频率、铁心材料和尺寸、传感器高度等。为减小传感器体积，提高抗电磁干扰能力，一般电压频率取 6 ~ 10 kHz，电压 20 V，铁心采用硅钢片或铁氧体材料，传感器安装高度 10 ~ 15 mm。电磁传感器对工件装配时的错边和点固点非常敏感，目前研制的漏磁抑制式、电磁抑制式和扫描式电磁传感器可以较好地抑制错边和点固点引起的干扰信号，但其灵敏度也有所降低。

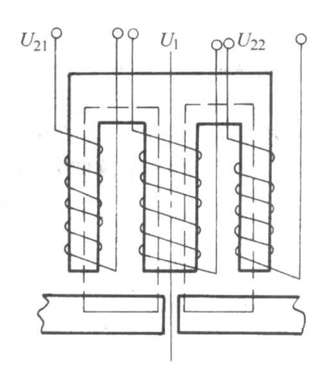


图 5.3-6　电磁感应式传感器原理图

电磁式传感器适用于对接、搭接和角焊缝，其体积大、使用灵活性差，且对磁场干扰和工件装配条件比较敏感，一般应用于对焊缝跟踪精度要求不甚严格的场合。

1.1.3　涡流式传感器及其应用

涡流式传感器原理如图 5.3-7 所示。在初级线圈 1 上加高频电流（f = 30 ~ 120 kHz），次级线圈 2、3 反极性串联。初级线圈高频电流产生高频主磁通，它在工件表面产生涡流。此涡流所产生的磁力线要削弱主磁通，从而影响次级线圈的感应电势，涡流强则感应电势减小。由于涡流不能穿过工件边界的缝隙，所以涡流在焊缝两边的分布与线圈 1 和焊缝的对中情况有关。当线圈 1 偏离焊缝中心线时，反极性串联的次级线圈输出一个偏差信号，该信号可以反映传感器偏离焊缝中心线的方向和大小。以此偏差信号为反馈量，控制电机动作即可使传感器及焊炬自动对中焊缝中心，实现焊缝跟踪的闭环控制。此外利用涡流产生的磁力线强度与传感器距离成一定的比例关系的特性，也可用来进行高低检测。

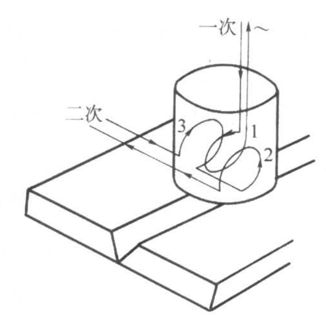


图 5.3-7　涡流式传感器原理图

1—初级线圈；2、3—次级线圈

涡流式传感器的优点是体积小巧、适用于各种金属材料的焊接（非铁磁材料精度略低）、由于密封性能好而可用于水下焊接；缺点是受温度和环境磁场影响较大。

1.2　视觉传感器及其在焊缝跟踪中的应用

1.2.1　常用焊接信息的视觉传感

焊接信息按其检测对象的几何特征可以分为点、线、面和体四种类型，而根据所采用的辐射光源的不同，又可以将视觉图像分为可见光图像、红外图像及 X 光图像等。在实际的焊接自动化、智能化控制中，可以根据所需要焊接信息的不同，选择不同视觉传感对象和视觉传感器件（设备），传感相应的视觉图像信号，并采用特定的图像信号处理方法从中提取焊接信息。表 5.3-2 给出了常用的焊接工艺、过程、质量信息的几何特征、视觉传感对象、光源类型及典型应用等。

由表 5.3-2 可见，焊接信息的视觉图像传感主要是对不同对象所具有的点、线、面和体的几何特征的视觉传感与识

别。针对这四种不同的几何特征，可以选择不同的光源、视觉传感器件和视觉传感原理，见表5.3-3。其中，将点的检测装置沿线移动，并辅以光电管阵列或线阵检测单元就可以检测出线。而面的检测除了采用流行的基于电扫描原理的CCD器件外，也可以通过点检测装置做全平面机械扫描或线检测装置做平行机械扫描来实现。体的检测往往是通过对多个面的检测结果的复合处理得到的。而相关几何特征的检测是由上向下兼容的，即体传感装置可以检测面、线、点；面传感装置可以检测线、面；线检测装置可以检测点。

表5.3-2 常用焊接信息的视觉传感

信息分类		对象	几何特征	光源类型	典型应用
工艺信息	接头形式、装配尺寸等	接头	面、体	可见光	焊缝跟踪、接头形貌测量、制定焊接工艺、选择焊接规范等
	焊缝坡口形貌	焊道	线、面	可见光	自动排道、焊缝跟踪、规范选择等
过程信息	电弧形态	电弧	面	可见光	焊接状态监测、光谱分析
	熔滴过渡	熔滴	面	可见光	熔滴过渡控制、熔滴尺寸检测
	熔池平面形状	熔池	面、线	可见光	焊缝成形控制
	熔池三维形貌	熔池	面、体	可见光	焊缝成形、熔透控制
	焊缝对中	焊缝	点、线、面	可见光	焊缝跟踪、路径规划
	温度分布	熔池	面、线	红外线	热循环控制、焊缝成形、熔透控制
	焊缝空间位置	焊缝	面、线	可见光	机器人路径规划、焊炬位姿调整
质量信息	焊缝成形	焊缝	点、线、面、体	可见光	无损检测、质量评估
	气孔、裂纹等缺陷位置尺寸	焊缝	点、线、面	X光、超声	无损检测、质量评估
	熔透程度	焊缝	线、面	X光、超声	无损检测、质量评估

表5.3-3 主要几何特征的视觉传感

几何特征	照射光源（器件）	视觉传感器件（设备）	视觉传感基本原理	对应的焊接信息
点	卤钨灯、红外发光二极管、激光管、可见光等	光电管、光电倍增管、光敏电阻、光电池、PSD等	三角测距	焊炬高度，焊缝位置等
线	卤钨灯、红外发光二极管、激光管、可见光等	光电管阵列、线阵CCD、线阵PSD等	三角测距	焊炬高度、接头尺寸、焊缝坡口特征、焊缝位置等
面	可见光、红外线、紫外线、X光等	面阵CCD、X光成像设备、可作机械扫描运动的线阵传感装置等	边缘检测图像分割	焊缝位置、熔池形状、熔深、缺陷位置与几何尺寸等
体	可见光	两个面阵CCD摄像机	双目视觉	焊缝空间位置、三维形貌等

1.2.2 焊接信息视觉传感器的基本原理

焊接中的视觉传感器按其检测组件特征的不同大致可以分为两类：一类是以单个或几个光电接收单元（包括线阵列）为检测组件的单光点式一维视觉传感器；另一类是机械扫描或电扫描的平面阵列成像式二维视觉传感器。三维视觉传感通常是对多个低维传感器获得的信息，进行综合处理运算来实现的。典型的一维、二维以及三维视觉传感器的基本原理如下所述。

（1）一维视觉传感原理

单光点式一维视觉传感一般是基于单点镜面反射成像原理的（见图5.3-8），光源聚焦为光点照射（或直接照射）到工件上，其反射光经过一定的光学系统传输到光电接收单元上。工件表面或焊缝坡口的高度信息与反射点位置存在对应关系。

常用的照射光源有卤钨灯、红外发光二极管、激光管等。卤钨灯具有发光效率高、体积小、功率大、寿命长等优点，激光管具有单色性、方向性和相干性好，辐射密度高等优点，而红外发光二极管具有耗电少、点燃频率高、使用寿命长和体积小等优点。

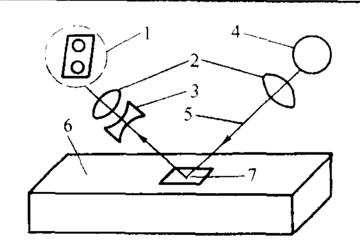


图5.3-8 单点镜面反射原理

1—光电接收单元；2—凸镜；3—凹镜；4—光源；5—光线；6—工件；7—光点

反射光的接收单元有光电管、光电倍增管、光敏电阻、光电池、PSD等，其中以光电管和PSD最为典型。光电管的光电流在一定范围内与入射光通量成正比，由多个光电管组成的光电接收屏（包括线阵列）可以用来检测工件反射光位置的变化，但因为其本质上是离散点检测，所以其灵敏度和动态范围有限。PSD是近些年发展起来的一种新型的光学接收器件，其基本工作原理如图5.3-9所示。当光点照射到光敏面上时，将有光电流产生，从两端电极输出的电流 I_1、I_2



与反射光点在光敏面上的位置 X_A 的关系为：$X_A = LI_2/(I_2 + I_1)$。PSD 输出的电流信号经过一定的运算处理后即可得到只与接收光点位置有关而与光强无关的信号。由于其检测出的光点位置信号是连续变化的，因此与光电管相比，PSD 位敏器件具有分辨率高，电路简单，动态响应快的优点。

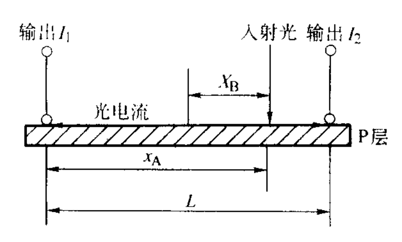


图 5.3-9　PSD 工作原理

将一维视觉传感器获得的光电流等传感信息转换为有效的反馈控制信号的过程，早期采用数学运算芯片及专门的硬件电路来实现。随着运算关系的复杂程度和控制要求的提高，现在更多地采用 A/D 器件将信号转换成数字量，送入计算机进行相应处理。此类传感器可以用于焊缝坡口的横向跟踪和焊炬的高度跟踪。

点和线的检测本质上都是基于三角测距原理，线的检测可以通过点检测装置的机械运动扫描或光学扫描来实现。图 5.3-10 所示为典型的以 PSD 为接收源的三角测距原理。光源发出的光经被检测面镜面反射到与光源中心在同一水平面上的 PSD 接收器件上。当被检测面的高度向下平移距离 H 时，PSD 上的光点位置平移距离 B，由图 5.3-10 所示的平面几何关系，可以求得：$H = B/2(\tan\alpha)$。基于这一原理，将发射源和接收源一起放置在平行于焊缝的平面内，沿焊缝横截面方向进行机械扫描，就可以获取焊缝深度等坡口特征。

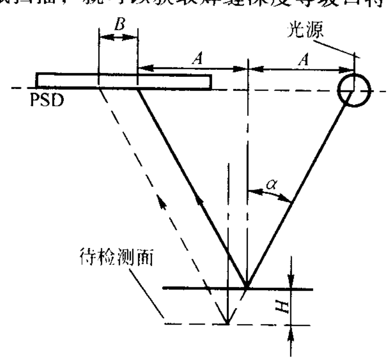


图 5.3-10　PSD 三角测距原理图

(2) 二维视觉传感原理

焊接中采用的二维视觉传感器有：象限光电管、摄像管、热像仪、面阵 PSD、面阵 CCD 等。图 5.3-11 给出了四象限光电管及其等效电路图。它将光电池或光电二极管的光敏面对称分割为四个部分，处在对称位置的两对光电器件 P_1、P_3 和 P_2、P_4 组成两对差动式光电接收器，可以用于偏差检测和位置跟踪。

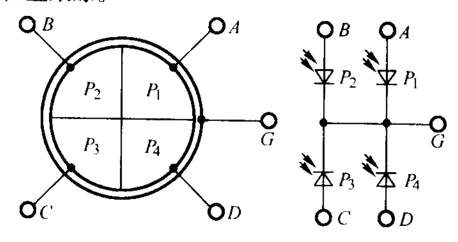


图 5.3-11　四象限光电管及其等效电路图

CCD 是 20 世纪 70 年代发明的光电效应固体成像器件，因其具有灵敏度高、噪声低、寿命长、检测精度高等优点，在数字存储、模拟信号处理及作为图像传感器方面得到广泛应用。用于工业图像信息传感的 CCD 像传感器通常分为线阵 CCD 和面阵 CCD 两种，它们既可以用于可见光的传感，也可以用于 X 光、紫外线、红外线成像。CCD 的基本工作原理如图 5.3-12 所示，光子不断撞击感光单元阵列，产生相应的电荷并被收集起来，一定时间的间隔之后，将电荷从感光区转移到光隔离存储区，然后再一行一行地转移到一个或多个输出寄存器，随后把这些电荷转换成电压转移到输出电极上。由于 CCD 的图像信息的形成、转移、存储以及信号输出的过程，依靠合理的时序脉冲驱动电路来顺利完成，可以进行高速扫描，因而可以用于图像信息的高速采集。目前国产线阵 CCD 器件已有 128、256、512 和 1 024 像素点等，面阵 CCD 有 100 × 100、120 × 150 和 320 × 256 像素点等，速度为每秒几十帧。国外线阵 CCD 已做到 4 096 像素点以上。面阵 CCD 已达到 4 096 × 4 096 像素点以上，而图像摄取速度则可达到每秒上千帧，最快的达到每秒 1 × 10⁴ 帧（64 × 64 像素点）。

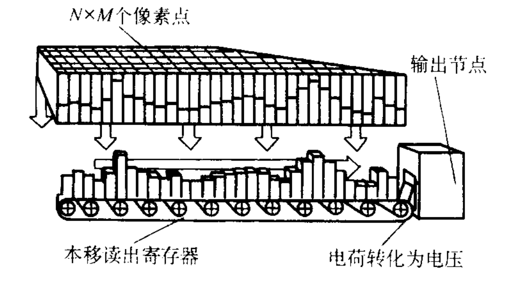


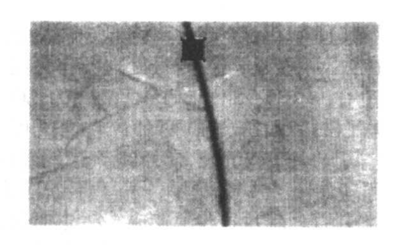
图 5.3-12　CCD 基本工作原理

视觉图像传感设备获得二维图像后，一般以时间域的模拟信号形式输出。通常还需经由图像采集卡上的 A/D 电路，在同步时钟的作用下转换为离散的空间域数据才能送入计算机处理。计算机内的图像按平面坐标方式分为 $I \times J$ 个（如 256 × 256、512 × 512 或 1 600 × 1 200 等分辨率）像素，每个像素又具有灰度 $G(i, j)$，根据数据采集卡上 A/D 的位数不同，像素灰度被分为相应的等级，如 8 位的 A/D 对应为 256 级灰度[1]。

二维视觉传感设备所获得的图像往往是由目标和背景混合组成，如以工件为背景的焊缝或熔池的灰度分布图像等。通常，焊接图像中需要检测的焊缝坡口棱边、熔池固液相界面等都具有空间起伏变化的特点。这些空间的差异必然会导致边缘处光线反射或辐射的突变，在图像上表现为边缘附近图像的亮度（灰度）或亮度（灰度）梯度有较为陡峭或不连续的变化。如图 5.3-13 所示的薄板对接接头的原始图像中，接头位置在二维灰度图像中具有明显的边缘特征。利用边缘处图像灰度梯度的变化剧烈（包括灰度的空间变化率和灰度空间变化的方向）的特点，可以通过在图像点的邻域内寻找极值的方法来定位可能的边缘点，再将相互邻接的边缘点连起来构成边缘线。在边缘检测的基础上，通过图像分割可以获得熔池、缺陷、坡口截面、接头形式等信息。

代表性的边缘检测方法有：空间导数法（如 Roberts、Prewitt、Sobel 等一阶正交梯度操作数，Robinson 和 Kirsch 等一阶方向梯度操作数，Laplacian、LOG 等二阶微分操作数）、模板匹配法、小平面模型法。边缘线提取的算法有边缘模型参考法（如 Hueckel 算法）、Hough 变换（用于直线）、广义 Hough 变换（用于曲线）和松弛法等。代表性的区域（图像）分割的方法有边缘检测法、灰度直方图域值法、灰度判别准则法、区域生长法等。





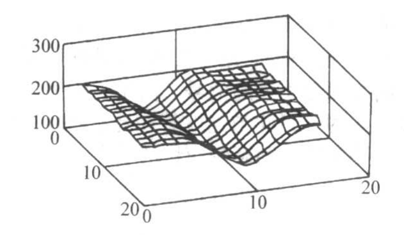


图 5.3-13　薄板对接接头原始图像和接头位置的边缘灰度分布图

(3) 三维视觉传感原理

当焊接控制要求和精度提高到一定程度时，就需要用到工件、焊缝、熔池等目标的空间坐标、位置状态等三维信息。

自二维图像中恢复和重建三维信息的方法有：双目立体视觉法、基于光流场的运动分析法、基于二维特征的运动分析法、三维特征匹配法、由图像灰度恢复三维物体形状法和激光扫描式结构光视觉法等。

双目视觉法是模拟人的视觉功能，用双摄像机从不同角度同时获取目标景物的两幅数字图像，通过一定的计算方法，重建周围景物的三维形状和位置。其基本原理如图 5.3-14 所示，对于空间物体表面的任意一点 P，如果用 C_1 摄像机观察，看到它在 C_1 摄像机的图像点位于 P_1，但却无法得知 P 的三维位置。因为在 O_1P（O_1 为摄像机的光心）连线上的任意一点 P' 的图像点都是 P_1，因此由 P_1 的位置，只能知道空间点 P 位于 O_1P_1 连线上的某一位置。如果用 C_1 和 C_2 两个摄像机同时观察 P 点，并且能够确定在 C_1 摄像机图像上的点 P_1 和 C_2 摄像机图像上的点 P_2 是空间同一个点 P 的图像点的话。则空间点 P 既在 O_1P_1 上，又在 O_2P_2 上，因此空间点 P 就是 O_1P_1 和 O_2P_2 两条直线的交点。双目视觉法是模拟人的视觉功能，用双摄像机从不同角度同时获取目标景物的两幅数字图像，通过一定的计算方法，重建周围景物的三维形状和位置，可用于焊接机器人路径规划、焊缝跟踪和焊炬姿态优化控制等。

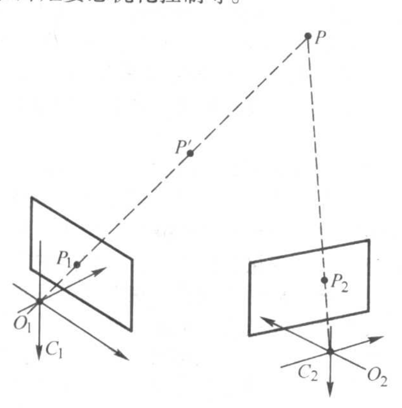


图 5.3-14　双目立体视觉原理图

二维图像上各点的灰度值反映了三维物体相应点上的反射光强度，而反射光的与物体表面性质和物体表面的几何形状有直接的联系。基于这一原理可以从图像灰度恢复三维物体形状，目前常用的有光度立体视觉方法和由单幅图像恢复物体形状的阴影法等，其中阴影法已经应用于 TIG 焊熔池三维形貌的重建。

经典的结构光三维视觉方法是将基准光栅条纹结构光投影到物体表面，条纹随着物体表面形状的变化而发生畸变，摄像机摄取物体表面图像；然后采用计算机图像技术，从被物体表面形状所调制了的畸变条纹模式中，提取出物体的三维信息。工业应用中，很少采用基准光栅条纹结构光，而是采用简化的激光扫描照射系统（见图 5.3-15）。图 5.3-16 所示为两种典型焊接接头的结构光传感图像与分析结果。激光扫描式结构光系统在焊缝跟踪、坡口形状与接头型式检测、多道焊排道等方面已有应用。

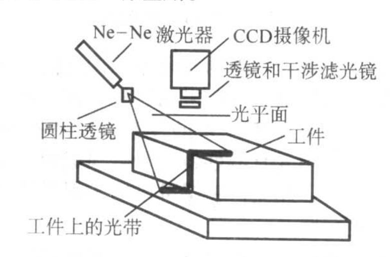


图 5.3-15　激光扫描式结构光系统示意

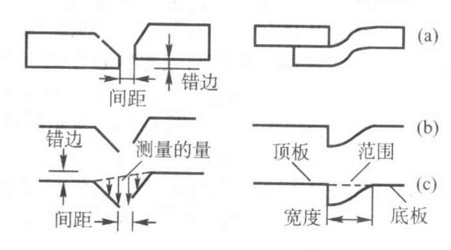


图 5.3-16　典型焊接接头的结构光传感图像与分析结果

上述三种三维视觉传感方法中，前两种既可采用主动光视觉，也可采用被动光视觉，而结构光三维视觉属于典型的主动光视觉。主动光视觉必须借助相应的外部照明系统来实现，系统较为复杂。相比之下，随着视觉传感设备和图像处理算法的发展，直接摄取目标的被动光视觉传感方法越来越得到重视。

基于上述焊接信息视觉传感原理，许多国外厂家都推出了相应的产品，其中以英国 Meta Vision Systems 公司最具有代表性。

1.2.3　Meta Vision Systems 公司产品简介

(1) 激光视觉传感器工作原理

传感器头包括一个 CCD 摄像机和一个或两个激光二极管（见图 5.3-17）。激光作为结构光源在传感器下方的工件上以特定的角度投射一条激光带。传感器的视场是可变的，以满足不同工作距离、焊缝类型和尺寸的要求。这使得摄像机可以看到位于传感器正下方的光带。摄像机的前面是一个光学滤光片，它只允许激光通过，而滤除包括电弧光在内的所有其他光线。因此，传感器可以在离焊接电源很近的位置

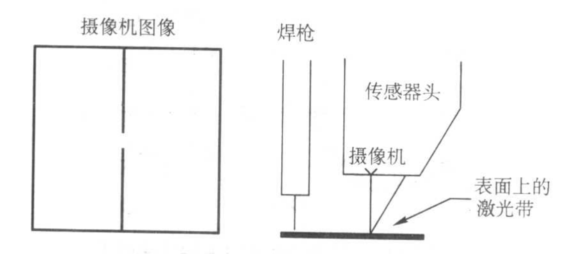


图 5.3-17　激光视觉传感器原理



工作。系统跟踪时，焊接速度和超前距离被用来计算垂直和水平修正量，以保证焊枪处于焊缝中心。跟踪系统可以以模拟、数字或串口方式与机器人或焊接设备的 PLC 接口。焊接设备的纠偏是通过电动滑块完成的。

（2）激光视觉传感器技术参数　见表 5.3-4a 和表 5.3-4b。

表 5.3-4a　Meta Vision Systems 公司激光视觉传感器技术参数（1）

传感器头型号	标称间距时的视场（水平方向）/mm	标称间距 /mm	相对有标称间距的有效深度 /mm	水平测量精度 /mm	垂直测量精度 /mm
MLP1/05	5	35	－3～＋5	±0.05	±0.05
MLP1/10	10	35	－6～＋9	±0.10	±0.10
MLP1/15	15	65	－15～＋20	±0.15	±0.30
MLP2/15	15	65	－15～＋20	±0.15	±0.30
MLP2/30	30	75	－30～＋45	±0.30	±0.75
MLP2/45	45	80	－30～＋45	±0.45	±1.00
MLP2/6	60	85	－35～＋55	±0.60	±1.50

表 5.3-4b　Meta Vision systems 公司激光视觉传感器技术参数（2）

不含飞溅罩的几何尺寸（大约）/mm	$H=100$　$W=40$　$D=60$
质量（大约）/kg	0.35
激光管温度/℃	最低＋5，最高＋50

（3）代表性产品简介

1）激光视觉焊缝跟踪系统（见图 5.3-18）　用于螺线管制造和车身焊接等高标准要求场合的激光焊缝跟踪系统。采用从传感器获取的数据，控制系统能够显示接头的几何形状、间距和错边，计算焊枪的最佳横向和垂直位置。该系统采用了适合于恶劣焊接环境的专利技术——无窗口“针孔”传感器设计；每秒钟计算 60 次焊枪位置偏差；适用于不同的接头类型、材料和可变的边缘条件；焊缝偏移量和附加长度完全可编程；集成焊接定位装置、台架、夹具和 PLC 于一体，实现自适应过程控制；优选的十字滑块、电机和编码器。



图 5.3-18　激光视觉焊缝跟踪系统

2）激光导航系统　因为零件可能变形或不一致、夹具可能磨损、装载可能低于 100% 的准确性等因素导致焊接机器人无法按编程跟踪预定的路径时，可以使用 Meta Vision Systems 公司的激光导航系统来保证每次都获得很好的焊缝。其中 MTF 焊缝识别系统（见图 5.3-19）可以用于汽车、汽车配件和办公设备工业领域中 50 mm 以下的跳焊焊缝的识别，也可以用来测量焊缝间隙、采用预置参数、修改焊接规划以获得交叉或多层焊道。MTR 标准机器人跟踪系统（见图 5.3-20）由一个激光传感器、摄像机电缆以及与机器人控制器接口的控制盒组成，适用于 TIG、MIG/MAG、等离子和激光焊接；焊接速度可达 4 m/min；传感器鲁棒性好，可在恶劣焊接环境下工作；配有适合于多种焊缝类型的示教装置；可在焊接过程中直接控制送丝速度和机器人运动速度等参数。

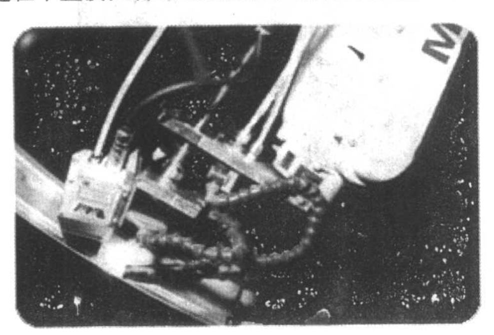


图 5.3-19　MTF 焊缝识别系统

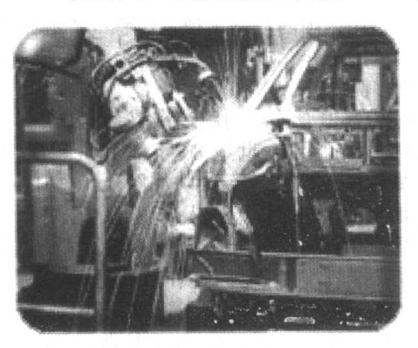


图 5.3-20　MTR 标准机器人跟踪系统

3）视觉监控系统　视觉监控系统（见图 5.3-21）是人工控制焊枪位置的最佳解决方案，该产品将一个独特的传感器用于复杂跟踪系统，提供给操作者详细的焊缝图像，以便从远程进行精确监控和过程控制。系统由 5～60 mm 可选的传感器头、安装支架、摄像机电缆、控制盒和监视器组成，可以在难以观察或接近的条件下获得精确的监控；焊接“第一时间”的高分辨率和细节；易于识别间隙变化，操作者可以安全、舒适地远程精确监测焊缝；操作者可以在其他位置完成更多的生产任务，减少因疲劳导致的人为误差。

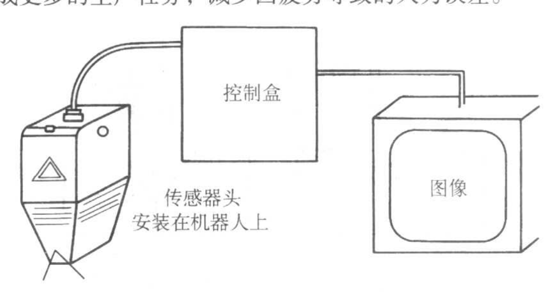


图 5.3-21　视觉监控系统

4）激光探测系统　激光探测系统（见图 5.3-22）由控制盒、激光传感器和手持操作盒组成，可以与十字滑块一起安装在已有的焊接设备上，作为自动化的焊缝跟踪系统，实现高生产率的焊接过程自动化。适合于 TIG、MIG/MAG、埋弧焊、等离子弧焊、激光焊等；易于与已有设备组合安装，无需编程；易于通过手持操作盒操作，焊接速度可达 8 m/min；易于与焊接设备控制器接口；易于与多种焊缝类型的



示教装置连接；可以在焊接过程中直接调整过程控制参数；可以与激光探测工具编程软件一起用于复杂接头等应用场合。

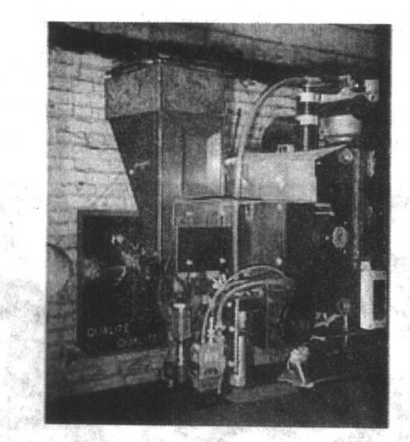


图5.3-22 激光探测系统

1.2.4 国内研究进展

与国外相比，国内在基于视觉传感的焊缝跟踪系统方面也开展了大量的工作，取得了一些进展，但成熟的、商品化的产品并不多见。

（1）激光-光电管式双向跟踪传感系统

图5.3-23所示为20世纪80年代初研制成功的一种激光-光电管式双向跟踪传感系统。如图所示，He－Ne激光器发出的光束，通过光导纤维进入传感器，在平行于焊接方向的平面内以一定角度投射于工件上，其反射光被多个光电管组成的点阵式接收屏所接收。横向跟踪原理如图5.3-23a所示：当光点打在钢板上时，G_1接收的信号增强并输出高电平；当光点打在坡口内时，G_1几乎接收不到信号，因而输出低电平；当光点打在焊缝棱边时，G_1信号处在设定的上下阀值之间。焊炬高度跟踪原理如图5.3-23b所示：高度正常时，G_1输出高电平，G_2、G_3输出低电平；高度偏高时，G_2输出高电平，G_1、G_3输出低电平；高度偏低时，G_3输出高电平，G_1、G_2输出低电平。计算机控制系统根据具体输出信号的不同，作出判断和决策，驱动相应机构，实现左右和高低的双向跟踪。由于该系统采用光电管点阵作为接收屏，其输出是二值化的开关量信号，所以在灵敏度、稳定性、跟踪范围和精度上有所局限。

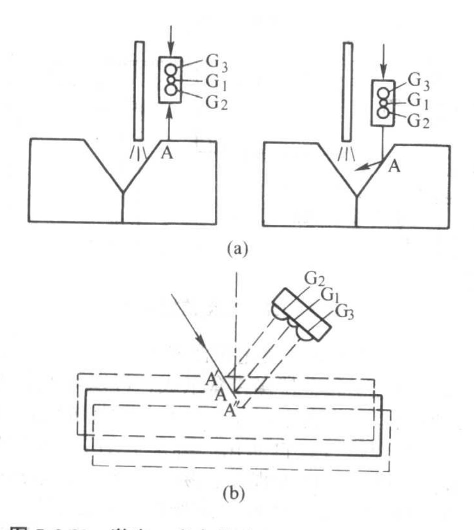


图5.3-23 激光－光电管式双向跟踪传感系统原理

（2）激光光学扫描式焊缝检测系统

图5.3-24所示为一种激光光学扫描式焊缝检测系统原理。激光束从水平方向照射到扫描轴的镜子上，再反射到工件上。从工件反射的光经过扫描轴的另一镜子反射到透镜，并在线阵CCD组件上成像。马达在正反转驱动下不停地来回转动，而使激光束在工件焊缝处横向扫描。线阵CCD成像点的位置与工件高度有着很好的对应关系：工件高度不变时，线阵CCD成像点的位置也保持不变；工件高度发生变化时，线阵CCD成像点的位置也相应的发生变化。计算机记录不同焊缝截面位置点x所对应的线阵CCD成像点，就可以获得x点的高度信息y，从而描述出焊缝坡口的截面形式和具体尺寸。还有一些与上述原理基本相同的变形机构，如某文献改变上述的摆镜转动机构，将固定在一起的发射源与接收器一起平行于焊缝进行扫描，来获取焊缝坡口特征。

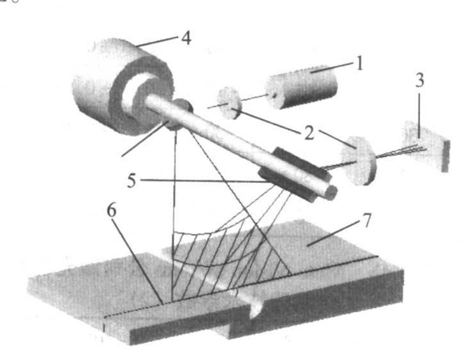


图5.3-24 激光光学扫描式焊缝检测系统原理
1—He－Ne激光器；2—棱镜；3—线阵CCD；4—电机；5—扫描镜；6—扫描光点；7—工件

随着相关技术的发展，低价、轻便的半导体光红外发光管逐步取代了He－Ne激光器，而精度更高、检测范围更宽的PSD、线阵CCD逐步取代了早期的光电管阵列。在信号运算处理上，也从最初的简单分立电路处理到中期的集成电路处理，发展为复杂的CPU处理电路。

（3）基于视觉图像传感的精密脉冲TIG焊焊缝跟踪系统

某复杂曲面工件由数百根管壁厚度仅为0.33 mm的薄壁不锈钢矩形管盘于锥体胎具上焊接而成（见图5.3-25），其焊缝是一条螺旋角时刻发生变化的空间螺旋线。工艺要求焊缝窄而浅，成形均匀美观，结构牢固。薄壁管和锥体成形的应力及焊接热变形等因素的存在，使其对变形引起的弧长和电弧位置的变化十分敏感，更易导致焊偏、焊穿或未焊透现象。

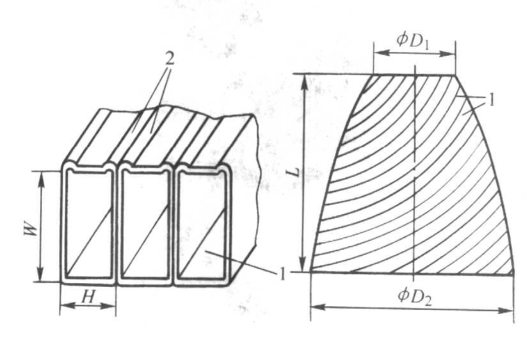


图5.3-25 复杂曲面薄壁不锈钢工件示意图

由于工件固定在锥体转胎上，焊缝的起点与终点在径向和轴向的变化量都比较大。为保证焊缝控制（及弧长跟踪）的精度，采用大误差范围内的轨迹控制与小误差范围内的精密跟踪相结合的方案，建立了如图5.3-26所示的基于视觉传感的精密脉冲TIG焊焊缝跟踪系统。



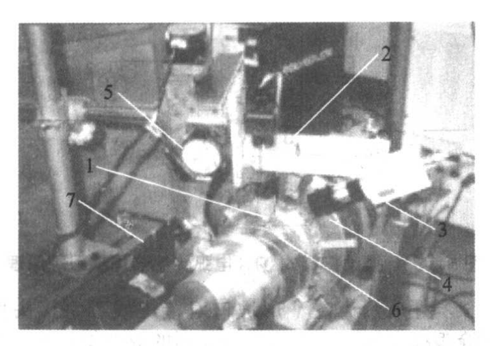


图 5.3-26　基于视觉图像传感的焊缝跟踪系统

1—钨极；2—支架；3—CCD 摄像机；4—旋转运动机构；5—焊炬位姿调节机构；6—工件；7—横向运动机构

图 5.3-26 所示系统具有以下特点。

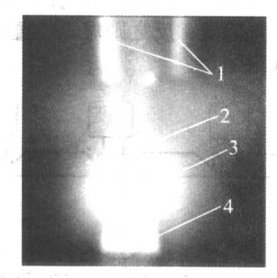
1）工件固定在一个可实现旋转运动的转胎上，焊炬及其位姿调整机构安装在一个能相对于工件旋转轴运动的平移运动机构上，通过对多轴伺服控制卡的编程，分别驱动转胎旋转电机和焊炬平移电机，实现焊炬沿螺旋线焊缝在一定误差范围内的轨迹运动。

2）焊炬及其位姿调整机构和工件旋转轴保持某种特殊空间关系，可以保证焊炬相对工件始终处于平焊位置，不仅便于控制焊接规范，而且减少了不同焊接位置对视觉图像的影响，提高了视觉传感图像的可比性。

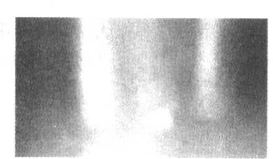
3）CCD 摄像机被置于焊炬的焊接方向上，通过支架与焊炬联结，并在焊接过程中与焊炬保持相对位置固定，可以拍摄到实时焊接过程中熔池及焊缝的图像。

4）图像采集卡接收 CCD 摄像机拍摄的模拟图像后，经过 A/D 转换成为数字图像，由计算机进行实时图像处理。计算机根据图像处理结果，驱动焊炬位姿调整机构，实时调节焊炬位置，实现高精度的焊缝跟踪。

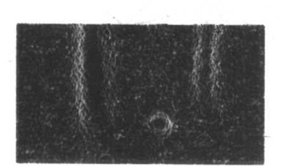
通过选择合适波长的滤光片，在脉冲电流基值期间的某一个电弧光强适中的时刻拍摄图像，可以有效地避免焊接过程中强弧光对视觉传感的干扰，可获取清晰、稳定、特征明显的实时焊缝图像。典型的视觉传感图像如图 5.3-27a 所示，图像上部是位于熔池前方的工件，较亮的两条垂直方向的平行棱线是被电弧光照亮的工件的两条棱，焊缝位于两棱之间；图像中部较亮的椭圆形区域为熔池；在图像的中下部为钨极的端部与电弧。由于在 CCD 所拍摄的较小视场范围内，可以近似地认为图像中的焊缝中心线是条直线。基于图像特征经过、中值滤波、Sobel 变换、二值化、求棱线的直线方程等步骤，可以快速、准确地识别焊缝中心线（见图 5.3-27）。



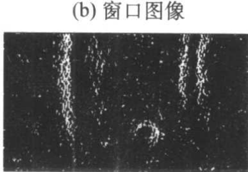
(a) 原始图像



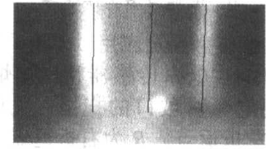
(b) 窗口图像



(c) SOBEL后的图像



(d) 二值化后的图像



(e) 提取棱线与焊缝中心线

图 5.3-27　焊缝中心线的图像识别

1—工件棱线；2—熔池；3—电弧；4—钨极

根据求得的焊缝中心线的直线方程和当前钨极在图像中的位置，可以方便地求出钨极偏离焊缝中心线的偏差量信号 E 和方向信号 D。当钨极位于焊缝中心线左侧时，$D>1$，步进电机正转，带动焊炬右移使钨极靠近焊缝中心线；反之，当钨极位于焊缝中心线右侧时，$D=0$，步进电机反转，带动焊炬左移使钨极靠近焊缝中心线。将步进电机的驱动脉冲信号频率固定，通过控制步进电机的使能信号 T_e 的时间长短来确定焊炬移动距离。钨极偏离焊缝中心线的偏差量信号 E 与焊炬移动时间 T_e 之间的对应关系可由式（5.3-1）表示。

$$T_e=\begin{cases}0 & E\leqslant\varepsilon_1\\ \alpha(E+M) & \varepsilon_2>E>\varepsilon_1\\ C & E\geqslant\varepsilon_2\end{cases}\tag{5.3-1}$$

式中，ε_1、ε_2、C 为常数；M 为与待焊处焊缝中心线的斜率相对应的调整量，M 的数值可由焊缝中心线的斜率以及焊接速度来决定；α 为比例因子，用以控制输出纠偏量的幅度。

即，当偏差量小于 ε_1 时，焊缝跟踪电机不动作；当偏差量大于 ε_2 时，焊缝跟踪电机仅运动一段固定时间 C，焊炬仅移动一个固定距离；偏差量介于二者之间时，焊缝跟踪电机动作时间正比于偏差量。

基于视觉图像传感的精密脉冲 TIG 焊焊缝跟踪系统可以在 120 ms 内完成图像采集、焊缝中心线识别、焊炬偏差计算及控制量输出等；系统运行稳定可靠，实时性好，抗干扰能力强，能实现焊炬运动方向与焊缝偏差角小于 30°的焊缝跟踪。将该系统与弧长跟踪系统相配合，可用于复杂曲面薄壁不锈钢试件的精密焊接。

1.3　电弧传感器及其在焊缝跟踪中的应用

电弧传感器的跟踪信号由电弧本身取出，并且没有传感器位置导前的误差。它可以进行高低和左右的双向自动跟踪。它不怕电弧的飞溅，烟、光等干扰。它已成功地应用于弧焊机器人及一般自动焊机的焊缝自动跟踪。

1.3.1　电弧传感的基本原理

电弧传感器的基本原理是利用焊枪与工件距离变化而引起的焊接电流参数变化，并根据焊炬与焊缝的已知几何关系导出焊炬与焊缝的相对位置等被传感量。图 5.3-28 说明焊枪导电嘴端部与工件表面距离 H_0 变化时焊接参数变化的过程，以缓降外特性为例（恒流外特性分析类此），在稳定焊接状态时，电弧工作点为 A_0，弧长 l_0，干伸长 L_1，电流 I_0，当焊枪与工件表面距离 H_0 发生阶跃变化增大到 H_1 时，弧长突然被拉长为 L_1，此时干伸长 L_1 还来不及变化，电弧随即在新的工作点 A_1 处燃烧，电流突变为 I_1，但经过一定时间的电弧自调节，弧长逐渐变短，干伸长增大，由于焊丝变化导致焊接回路电阻发生变化时，最后电弧只能稳定在一个新的工作点 A_2，弧长 l_2，干伸长 L_2，电流 I_2。结果是干伸长和弧长都比原来增加。同样的，如果 H_1 发生阶跃变



化，减少到 H_0 时，电弧工作点将由 A_2 跳到 A_3（此时干伸长 L_2 还来不及变化），弧长 L_3，电流 I_3。经过一定时间，弧长自动调节后。电弧工作点又由 A_3 回到 A_0。由以上所述，当焊枪与工件表面距离发生变化时，电弧工作点和焊接电流均将发生变化。但存在动态和静态两种情况。例如焊枪高度由 H_0 增为 H_1 时，动态电流变化为 ΔI_D，而静态电流变化为 ΔI_S。实验数据表明，若焊丝直径为 ϕ1.2 mm，焊接电流为 215～280 A，焊接电压为 26～30 V，则导电嘴与工件距离变化 1 mm，ΔI_S 的变化为 5 A。换言之，每毫米的变化可导致焊接电流 1.4%～2.4%的变化。因而在焊接速度不是很快的条件下利用静态变化作为信号进行自动跟踪的控制也是完全可能的。

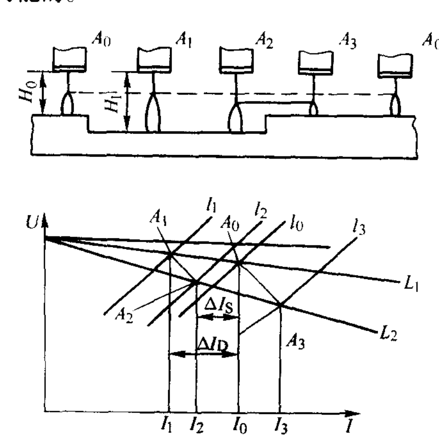


图 5.3-28　电弧传感工作原理

1.3.2　摆动扫描式电弧传感器及应用

摆动扫描式 MIG/MAG 电弧传感器利用焊炬沿焊缝垂直方向的低频摆动实现电弧对坡口的扫描，见图 5.3-29。图 5.3-29 中 L 为扫描的左折返点，R 为右折返点，C 为扫描的中心。通过比较 CL、CR 之间的电流电压波形也可以判断 C 是否对准坡口中心线。

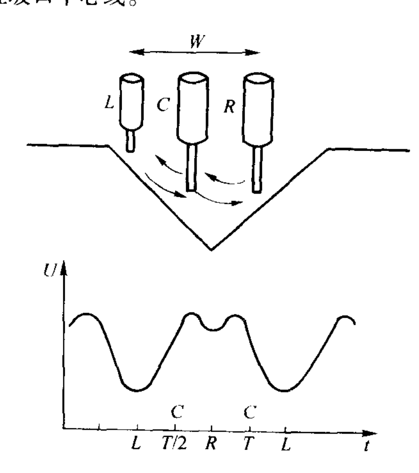


图 5.3-29　摆动扫描式 MIG/MAG 电弧传感器原理

TIG 焊通常采用恒流或陡降电源外特性，它的传感信号来自焊炬高度变化时的电压变化，图 5.3-30 所示为 TIG 焊电弧传感器焊缝跟踪原理。系统中引入弧压闭环反馈控制，使焊炬在 X 方向上的摆动扫描过程中，自动调整其自身在 Y 轴上的位置。安装在 Y 轴上的位移传感器将焊炬在 Y 轴上的位置与一个给定值 e_0 比较，以 e_0 作为焊炬摆动折返的阈值。此控制可以保证焊炬的摆动中心与坡口中心一致，并可在坡口宽度变化时自动调整摆动宽度。

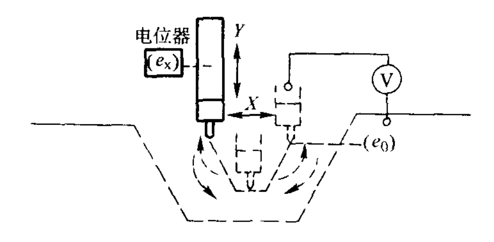


图 5.3-30　摆动扫描式 TIG 电弧传感器焊缝跟踪原理

图 5.3-31 所示为在 V 形坡口对接焊或丁字接头焊接的两个焊缝跟踪实例，一个是采用并列的双丝焊；另一个是采用机头横向摆动。在双丝焊时，两个电弧彼此独立，但可共用同一平特性焊接电源。若焊炬的中心线未对准坡口中心，其左右两焊丝具有不同的干伸长度，因而将造成不相等的焊接电流。根据两个电流差值的大小和正负即可判断电弧位置并进行左右跟踪。根据两个电流之和即可进行高低跟踪。同样，利用机头作横向摆动，由左右两边干伸长度的变化情况，也可求出焊缝左右和高低的跟踪信号。在焊炬与坡口中心对中时，机头摆到左右两侧的干伸长度相等，电弧电流相等。若焊炬与坡口不对中，则电弧电流差值的大小和正负，就可以作为输出信号来判断焊炬的横向位置。利用这两个电流之和，就可反映焊炬的高低位置：若电流之和大于给定值，则焊炬位置偏低；反之则焊炬位置偏高。这样就可以进行焊炬的高低跟踪。

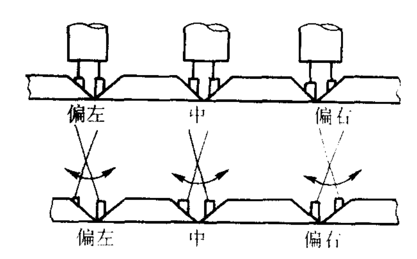


图 5.3-31　电弧传感横向跟踪方案示意图

图 5.3-32 所示为一个采用电弧传感方式的三维焊缝自动跟踪系统。机头上共有四个直流电动机：一个驱动机头沿焊缝行走，M_1 控制上下运动，M_2 控制横向运动，M_3 通过凸轮 C 使焊炬摆动。摆动频率 3 Hz 左右，焊丝横向摆幅约为 4～6 mm 左右。M_3 之另一端有一对无触点开关 S，当焊丝摆至左、右端时，各输出一脉冲信号送入控制器指令测量电流数值。电流数值取自一分流器（200 mV/600 A）控制器根据左右位置脉冲信号，将左右两端电流信号之和（$U_L + U_R$）用以控制上下运动。信号之差（$U_L - U_R$）用以控制横向运动。

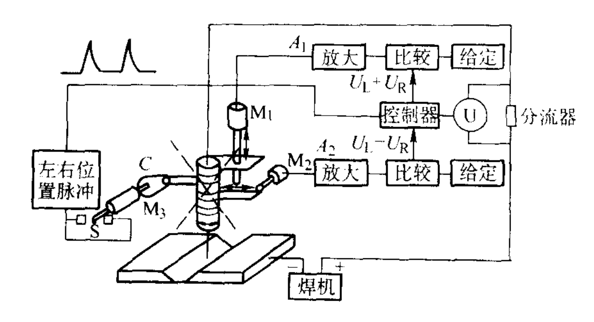


图 5.3-32　采用电弧传感方式的三维焊缝自动跟踪系统

1.3.3　弧焊机器人焊缝跟踪电弧传感器及应用

利用机器人相关轴的摆动可以很方便地实现摆动扫描式电弧传感器的功能。美国 Miller 公司的 MRV-6 型弧焊机器人

就是利用第四轴或第五轴的摆动来实现焊缝位置的电弧传感的。见图 5.3-33，电弧传感器通过摆动扫描焊缝接头，并同时监测摆动过程中焊接电流相对于焊丝位置以及焊丝末端与工件母材之间的距离变化，来检测焊丝与焊缝之间的位置偏差。焊缝跟踪的灵敏度随着摆动幅度的增加而增加，但过大的摆动幅度将影响电弧的稳定性导致焊缝成形变差。一般情况下，合适的摆动宽度下能提供的焊缝跟踪灵敏度优于 1.55 mm。焊接速度在 60 ~ 100 cm/min 时，MRV-6 型机器人的最低摆动频率为 5 Hz。在实际操作中，操作者需要预先设定水平偏差、高度偏差、水平跟踪灵敏度和垂直跟踪灵敏度这四个初始参数，前两个参数是根据接头类型的不同修正检测到的位置偏差（见图 5.3-34、图 5.3-35），后两个参数决定了检测到偏差后系统的响应速度。同时 MRV-6 型弧焊机器人还为实际焊缝与示教焊缝偏差的检测和修正、焊接起始点偏差的检测和修正提供了相应的焊缝跟踪功能和接触传感功能，这两种功能的组合可以克服工件本身尺寸变化和工件装夹误差的影响，获得一致性好的高质量焊缝。

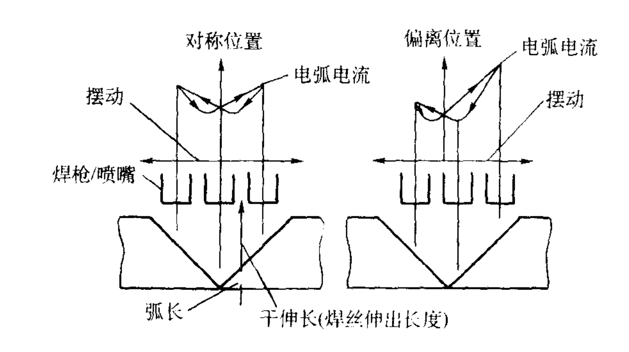


图 5.3-33 电弧传感器工作原理

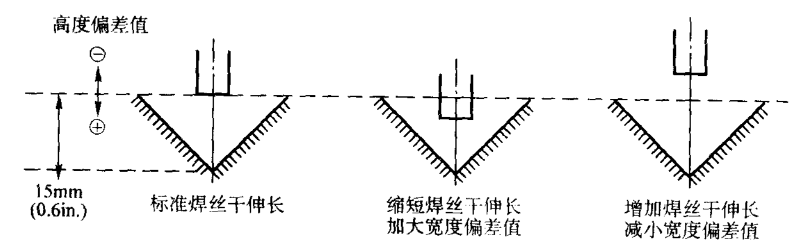


图 5.3-34 高度偏差值检测原理

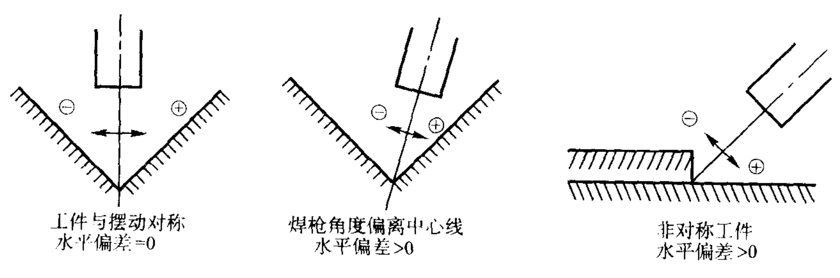


图 5.3-35 水平偏差值检测原理

1.3.4 旋转扫描式电弧传感器及应用

旋转式扫描首见于日本 NKK 公司关于窄间隙焊接的报道中，是针对摆动式扫描频率低的缺点提出的一种新的电弧扫描方式。此方式中电弧和焊丝的伸出端围绕着焊炬中心线作圆周运动，其原理与摆动式 MIG/MAG 电弧传感器相同，但是频率容易提高，可以获得较高的灵敏度。目前该方法应用于窄间隙焊接和角焊缝焊接中。

图 5.3-36 所示为野村博一首先提出的导电杆转动方案，该方案中，用电动机驱动导电杆转动，利用导电嘴上的偏心孔使焊丝端头和电弧旋转。由于导电杆是处于高速转动的状态。焊接电缆与导电杆之间无法直接相连，需要有一类似电刷的石墨滑块将数百安培的焊接电流传送到导电杆上。这对于焊炬的设计、加工和寿命都是不利的。同理导电杆和导电嘴转动而通过导电嘴的焊丝不转动，因此导电嘴和焊丝之间存在高速相对运动，大大增加了导电嘴的磨损，这无疑增加了对导电嘴材料的要求。此外，该方案中导电嘴和导电杆的冷却也难以保证。

为了克服这个方案的缺点，1980 年清华大学研究成功一种新的旋转方案，命名为 RAT－I（Rotating Arc Torch），见图 5.3-37。在方案中导电杆本身并不旋转，而是一端悬挂在球铰 *A* 上作圆锥摆动。球铰 *A* 即为圆锥的锥顶，导电杆是圆锥的母线，圆锥的底边就是电弧旋转的轨迹。驱动导电杆运动的是一个带偏心孔的齿轮，它通过一个自动调心轴承与导电杆相连，它只能拨动导电杆而并不向导电杆提供其他约

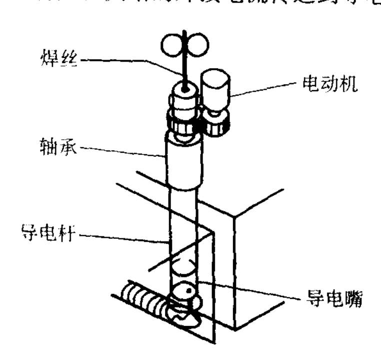


图 5.3-36 旋转扫描式 MIG/MAG 电弧传感器

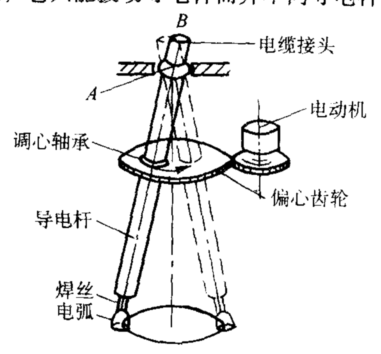
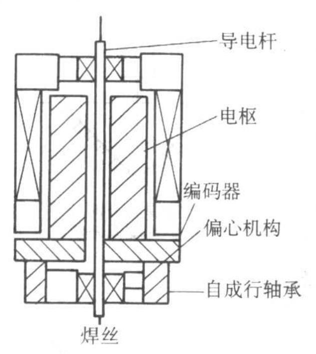


图 5.3-37 圆锥摆动式旋转电弧传感器

束。因此在这样一种方案中，导电杆可以只有绕圆锥轴的“公转”而没有绕自身轴线的“自转”，于是就带来了这样一些优点：导电杆、导电嘴与焊丝之间没有因转动而造成的相对运动，减少了导电嘴的磨损；在靠近球铰 A 的导电杆伸出端 B 处，实际存在的运动幅度极小，导电杆可以与电缆直接相连而不需要电刷；导电杆上可以直接安装水冷套，不必担心放置而造成的水冷管缠绕。频压转换器可以把分度孔脉冲转换成与脉冲频率成正比的电压信号。将这一信号作为电弧的转速反馈引入电动机驱动电路，可以实现电弧旋转速度的反馈控制。这种方法比对电动机电枢电压进行反馈控制具有更高转速精度。

高速旋转式扫描焊炬 RAT－I 的主要性能指标为：扫描频率调节范围 1～50 Hz；扫描半径调节范围 0～4 mm；额定焊接电流 500 A；电动机功率 25 W；焊炬冷却方式水冷。

旋转电弧传感器（RAT－I）型采用直流电动机驱动，一级齿轮减速传动。由于有齿轮传动，结构较大，影响了焊炬的可达性。传动件引起噪声严重，又由于传动件的安装精度和易受烟尘污染而使转动时因受力不均而不平衡。1993 年清华大学设计出更为可靠实用的轻巧的 RAT－Ⅱ型空心轴电动机驱动旋转扫描焊炬，见图 5.3-38。结构说明如下：以空心轴电动机作为原动机，导电杆斜穿过电动机空心轴。在空心轴上端，通过同轴安装的调心轴承支承导电杆，该位置处导电杆偏心量为零，调心轴承可安装在电动机轴上或机壳上。在空心轴的下端，外偏心套安装在轴上，内偏心安装于外偏心套内孔中，调心轴承安装于内偏心套内孔中，导电杆安装于轴承内孔中，该处导电杆偏心量由内外偏心套各自偏心量及内偏心套相对外偏心套转过的角度而决定。当电动机转动时，调心轴承将拨动导电杆作为圆锥母线绕电动机轴线作公转，或称为圆锥摆动。



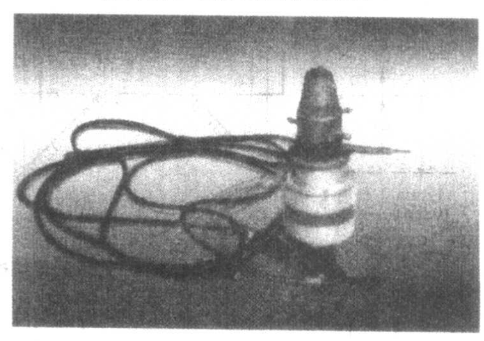


图 5.3-38　空心电动机旋转扫描焊炬示意及外形照片

由于导电杆两个支点都通过轴承与其他构件连接，因此没有其他约束时，其自转是自由的。当气、丝、电等管线直接连接到导电杆上后，导电杆受到约束而不能自转。而公转不受影响。由于圆锥摆动的幅度较小，管线也可以不在锥顶附近接入。采用双层气体保护，这是由于导电杆的运动搅动气体影响保护效果。实验结果表明，外加一层保护可以消除这种影响，达到良好的保护效果。

RAT－Ⅱ型旋转焊炬的主要性能指标为：外径 80 mm；旋转频率 14.5～36 Hz；最大旋转半径 4 mm；最大焊接电流 350 A；电动机空心轴：外径 12 mm、内径 17 mm；导电杆外径 12 mm、内径 7 mm、内通送丝软管。

旋转扫描焊炬的电弧能以很高的速度旋转，因此可以实现高精度的焊缝跟踪。因为同样的弧长变化所引起的电流及电压的动态增量要比低速摆动时大得多，对于小坡口或高速焊的适应能力得以提高。旋转扫描焊炬可以应用于焊缝焊炬横向与高低方向的偏差传感、焊缝坡口表面轮廓线检测等场合。

图 5.3-39 所示为由电弧扫描传感器、跟踪调整机构和跟踪控制系统三部分组成的旋转电弧传感焊缝跟踪系统。电弧扫描器由旋转焊炬、测位电路和闭环调速电路组成，可以实现焊炬不同频率和幅度的扫描运动，旋转扫描时通过光码盘来测位和测速，实现转速的闭环调节控制并确定扫描位置，将扫描的位置信号输出给计算机进行信号采集与处理。它与焊接电源和送丝机一起实现电弧的扫描传感。双向跟踪调整由直流电机驱动，丝杆螺母传动的十字滑块机构完成，可进行精确的高低左右位置移动，动作平稳。旋转扫描焊炬与带有十字滑块的行走小车构成了整个焊缝跟踪机构。跟踪控制系统通过霍尔传感元件检测电流并实现控制回路与主回路的高度绝缘，具有线性度好、测量精度高、响应速度快的优点，电流信号经过 A/D 转换后送入计算机，计算机根据电弧扫描系统送来的位置信号进行实时中断采样，经信号处理后，输出双向跟踪控制信号给跟踪调整机构。采用所研制的旋转电弧传感焊缝跟踪系统对三维空间的弯曲焊缝（Z 形弯板船形焊，板弯曲角度 25°，实际焊缝左右和高低方向弯曲角度为 18°）进行了 CO_2 焊接跟踪实验，结果表明双向自动跟踪系统工作良好，被焊工件形状及焊缝实物照片见图 5.3-40。

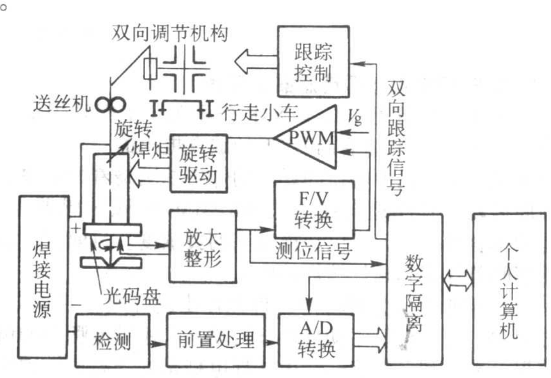


图 5.3-39　旋转电弧双向焊缝跟踪系统原理

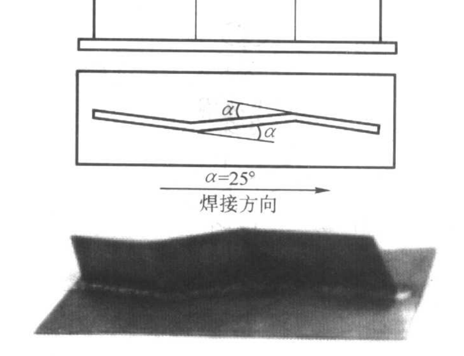


图 5.3-40　被焊工件形状及焊缝实物照片



为了适应工地上长焊缝、大幅度弯曲或转折焊缝以及有上下坡焊缝的生产要求，清华大学研制了如图 5.3-41 所示的采用旋转扫描焊炬多自由度焊接小车。其结构原理见图 5.3-42，小车左右共轴线两车轮由两个电动机分别驱动，带有电动焊炬横向和高低调节机构。各采用直角坐标式，具有手动的焊炬左右姿态调节机构和电动的前后姿态调节机构。各电动调节自由度为控制器实现实时调整提供了条件。小车车轮采用永磁材料。同时考虑到实验过程中以水平施焊为主，还配有胶轮。焊接小车共有五个电动调节的自由度，另有焊炬旋转电动机，因此共有六个电动机，其中横向调节机构与焊车车体的双自由度重合。

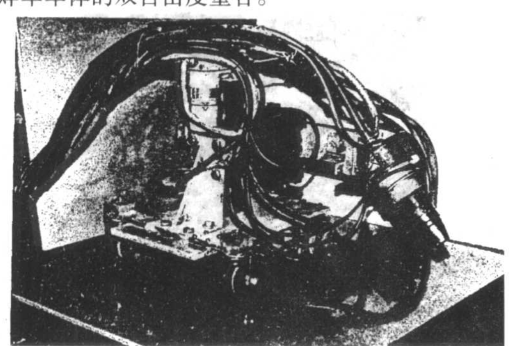


图 5.3-41　采用旋转扫描焊炬多自由度焊接小车

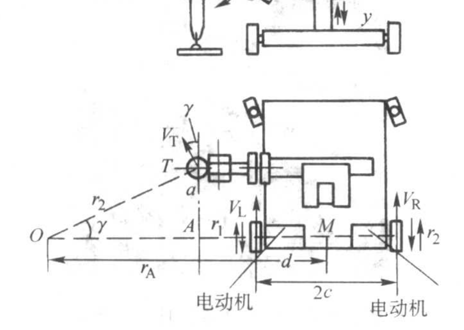


图 5.3-42　多自由度焊接小车结构原理图

图 5.3-43 所示为该系统用于焊接一转折角度为 43°的角焊缝，焊炬左斜 45°施焊，结果表明焊接过程中小车能够跟随转弯至焊缝平行后改为直行，系统工作效果良好。

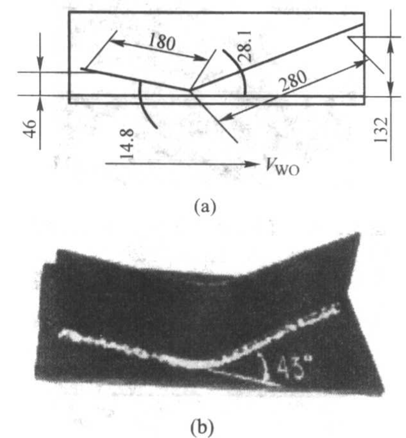


图 5.3-43　焊接小车转弯跟踪实验效果

1.4　智能机器人视觉系统

目前应用广泛的焊接机器人大多属于示教再现型机器人，操作者通过示教盒在直角坐标系和极坐标系中移动机器人各关节，使焊炬沿焊接轨迹运动，在焊炬路径上记录示教的位置、焊炬姿态、运动参数和工艺参数，并生成一个连续执行全部操作的示教程序。此类机器人存在的不足之处为：不适合在太空、深海、放射性环境等特殊环境下作业，对工件装配误差、焊接过程中的热变形等环境和工作对象变化不具备自适应能力等。新一代的具有视觉传感功能的，能够根据“看”到的焊缝空间位置，自动制订运动轨迹、焊炬姿态和焊炬参数的智能机器人成为未来的发展方向。

为此，国内外许多研究人员对机器人视觉系统在焊接接头特征识别、焊接参数优化、焊炬位姿调节、焊接路径规划、焊缝跟踪、焊缝熔透控制等方面的应用开展了卓有成效的研究。其中，Meta Machines Ltd. 的 R.J. Beattie 等研制成功的用于机器人多道焊的视觉传感系统，能够随着工件位置的变化而修正机器人位置，能够选择合理的参数来完成接头焊接。所开发的软件系统不仅能够识别接头类型，寻找到接头的侧面，而且能够测量接头顶部的宽度和截面积。焊工可以使用该软件规划多道焊的工序和路径以及每条焊道的敷熔量。采用该视觉传感系统可以自动选择各焊道的焊接规范参数而无需记忆跟踪。该系统首先通过示教来建立不同接头、坡口以及相应的根部、侧边等跟踪位置的视觉模型。在焊接开始时，机器人能够通过视觉系统寻找到与视觉模型库相匹配的需要焊接的接头，随后测量接头的相关参数，并计算出合理的焊炬位置，选用合理的焊接规范参数。

图 5.3-44 所示为 KK&S Instruments Pty Ltd 公司的 Quick-Track 机器人焊接焊缝跟踪器，可以直接用于机器人，也可以其他焊接装备配合使用[46]。采用旋转激光扫描专利技术，可以通过三维扫描检测焊缝“起始、终止点”，可以自动生成复杂三维零件的最优焊枪路径图，可以扩展为示教在线功能，可以用于 TIG、Plasma、MIG/MAG 和激光焊接。技术数据：体积为 90 mm（长）×45 mm（直径）；质量约 0.30 kg，工作温度为 5～50℃；采样速度 8 kHz，分辨率为，横向85～350 μm，深度 85～350 μm；视窗为 10～75 mm；间隔距离 40～200 mm；视场深度为 20～100 mm。

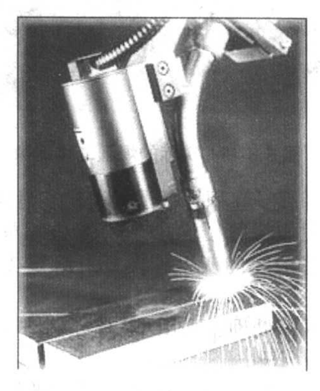


图 5.3-44　QuickTrack 焊缝跟踪器

1.4.1　国内研究进展

如何利用算法从多干扰的焊缝图像中识别出焊缝位置，是弧焊机器人智能视觉系统首先要解决的问题。传统的图像识别方法，主要是模板匹配法和依据边缘检测、图像分割的识别算法。对焊缝而言，由于其位置不是固定的，且工件表面的铁锈等干扰有可能掩盖焊缝的信息，所以简单的模式匹配识别法不适合焊缝图像的识别。边缘检测及滤波算子易使干扰源的边缘与目标物的边缘相混，易造成识别错误。

下面依次介绍国内在二维焊缝图像识别、由焊缝的二维图像重建其三维信息、弧焊路径规划、焊缝空间位置的检测与焊炬姿态的规划方面的研究进展。



(1) 焊缝二维图像识别

焊缝识别，即确实焊缝坡口边缘线的位置，是焊缝三维坐标计算和路径规划的基础。

在焊缝的二维图像上，与工件表面的铁锈、斑点、划痕等相比，焊缝坡口边缘有以下特点：焊缝坡口边缘线光滑连续，而各种干扰源基本以极不规则的曲线边缘为主，连续性差；在局部小窗口处理焊缝图像时，窗口中的焊缝边缘线可以近似为直线，而在各种干扰源的边缘处，各点的法向随机变化，没有明显的规律，且边缘线上各点处的曲率都很大。以常用的V形坡口为识别对象，可以建立如图5.3-45所示的焊缝的图像模型。

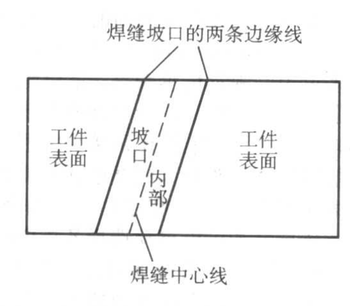


图5.3-45　焊缝二维图像的识别模型

1) 基于直方图统计法的焊缝二维图像识别　基于直方图统计法的焊缝二维图像识别算法主要由以下几个程序模块组成：平滑和边缘算子卷积；神经网络阀值处理；角度直方图"与"截距直方图；聚类法确定边缘位置。针对图5.3-46所示的实际焊缝二维图像，处理过程如下。

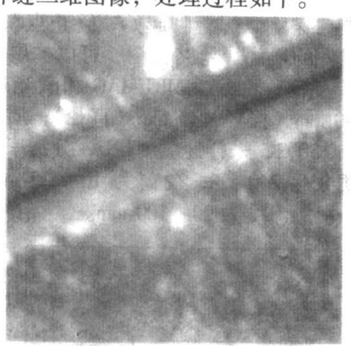


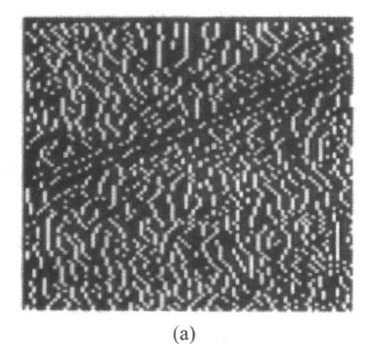
图5.3-46　实际的焊缝二维图像

平滑和边缘算子卷积：平滑过程初步消除各种各样的干扰，边缘检测用边缘算子SOBOL算子进行梯度计算，边缘算子得到的焊缝边缘的灰度梯度场和梯度方向场分别见图5.3-47。

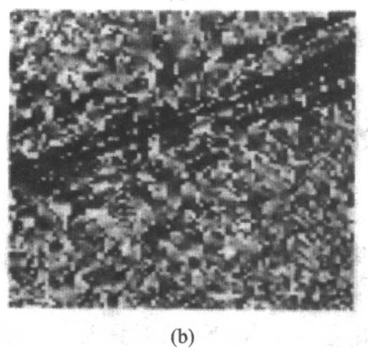
神经网络阀值处理：采用BP神经网络来计算滤波的阀值。

直方图滤波：对阀值处理后焊缝图像中的每一个像素点，根据它本身的边缘角和它在窗口的位置，可以求出该像素点所对应的边缘线在坐标轴上的截距。经上述计算，对每一个留下的像素点，都对应了两个特征值，即边缘倾角和边缘线截距。然后进行边缘角度和边缘截距的直方图统计。根据焊缝的二维图像模型，显然只要是焊缝边缘上的点，那么在角度直方图上，该点一定位于峰值，在截距直方图上，该点一定位于两个峰值中的一个。基于此，对这两个直方图进行类似逻辑"与"的运算，将同时位于角度直方图和截距直方图峰值附近的像素点保留。阀值处理和直方图统计滤波的焊缝图像见图5.3-48、图5.3-49。

用聚类算法确定焊缝边缘位置：经过上述处理后，用Hough聚类算法将焊缝的准确位置找出，其结果见图5.3-50。



(a)



(b)

图5.3-47　焊缝边缘的灰度梯度场（a）和梯度方向场（b）

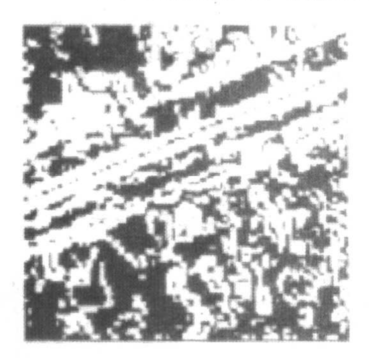


图5.3-48　阀值处理后的焊缝图像

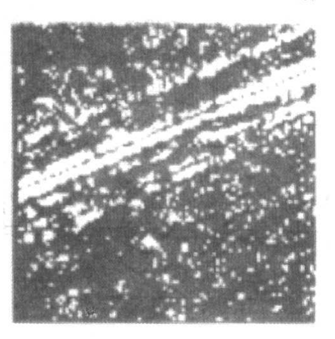


图5.3-49　直方图统计滤波后的焊缝图像

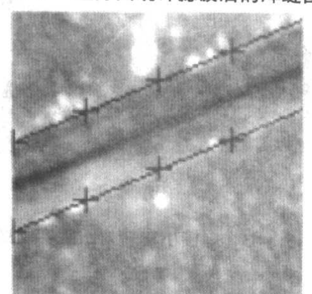


图5.3-50　聚类算法得到的焊缝图像

采用该算法可以对环境光下对接 V 形、I 形坡口和搭接坡口的二维焊缝图像进行识别。

2）基于分形理论的焊缝图像识别方法　传统的图像处理算法往往拘泥于图像的微小细节，受到图像中每一点精度的影响，造成图像处理时对噪声和其他干扰比较敏感，因此容易将干扰信息误检为图像边缘，而且存在图像处理用时多，信息利用率低（视野较小）等不足。

采用分形理论的图像处理方法是从宏观的角度出发，首先利用图像的分形特征找到图像的模糊边界区域，其次在这些初步界定的局部范围内进行精确的微观边缘检测。由于边缘检测只在模糊区域里进行，所以检测的时间将大大减小，而且对拐角、线条、线端点和孤立点的敏感度将降低。这种图像处理方法可以减少处理的数据量，节省时间，提高精度，对干扰噪声严重的焊接过程图像处理效果尤为明显。

一般焊缝图像的灰度强度函数$F(x,y)$可视为图像平面上的二维随机变量，该变量在一定范围内的分布规律，体现了图像的相对宏观的平均特性。

在图像中选取一块区域，其灰度强度函数定义为$F(x,y)$。因为图像灰度场满足离散分形布朗增量随机场，图像的分形维数 H 可表示为微分形式

$$H=\frac{\partial \lg\{E[\Delta F(k)]\}}{\partial \lg[\Delta r(k)]} \tag{5.3-2}$$

式中　$\Delta r(k)=\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}$

$$\Delta F(k)=\frac{\sum_{x_1=0}^{M-1}\sum_{y_1=0}^{M-1}\sum_{x_2=0}^{M-1}\sum_{y_2=0}^{M-1}[\,|F(x_2,y_2)-F(x_1,y_1)|\,]}{P_n(k)}$$

涉及的矢量有所有的像素点之间尺度变化范围 Δr，像数对数目 P_n 和多尺度灰度差 ΔF。$P_n(k)$为在距离$\Delta r(k)$下所有像素对数目，$\Delta F(k)$表示在此种距离下灰度差绝对值的均值。

分别计算$\lg[\Delta r(k)]$及$\lg[\Delta F(k)]$，$k=1,2,\dots,n$，得到一组数据点对$\lg[\Delta r(k)],\lg[\Delta F(k)]$，用最小二乘法拟合可得直线 $y=Hx+b$，并计算直线拟合残差 $\sigma=\sum_i[\lg E(\Delta F)-H\lg(\Delta r)-b]^2$，最终得到三个分形特征参数 H，b，σ。其物理意义分别是：H 值表征焊缝图像的分形维数，维数大小为 $3-H$，b 值表征图像灰度变化的剧烈程度，σ 值表征直线拟合数据点的线性程度。

在图像处理时，先利用分形特征对图像进行区域检测，确定边缘所在的区域，然后再在这些区域中使用边缘检测方法进行微观的边缘检测，最后准确地检测出边缘线的位置。图像处理的流程如图 5.3-51 所示。

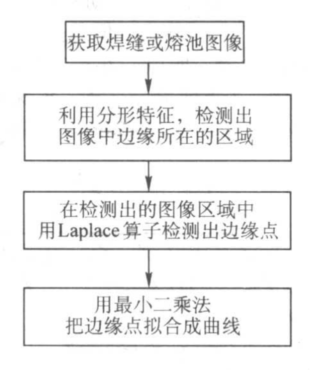


图 5.3-51　基于分形理论的焊缝图像处理流程

边缘所在的模糊区域的检测方法是：在图像中先选取 144×144 像素大小的图像窗口，再从该图像窗口的左上角开始，以 6 个像素长为步长，选取 12×12 像素大小的小窗口，水平垂直顺序移动小窗口，计算各小窗口的分形特征参数 H、b 和σ。

图像处理实验表明，由位于焊缝边缘区域的小窗口计算得到的数据对拟合直线的斜率 H 均在 1.0 左右，而一些不在焊缝边缘上的图像窗口中的图像虽然也存在类似边缘的变化趋势，计算所得的 H 值也在 0.8～1.0 范围内，但是与焊缝边缘图像模型的不同之处在于非边缘图像的灰度变化要平缓得多，焊缝边缘区域对应的 b 值较大，因此可以利用这一特征来区分边缘和非边缘区域。

在检测出边缘区域后，用 Laplace 算子进行边缘点检测，然后用最小二乘法对检测出的边缘点拟合成直线或曲线，得到边缘线在图像中的二维直线方程或熔池边缘在图像中的多项式方程。由于熔池边缘是一个封闭曲线，所以在实际的拟合中，可以将边缘点分成几个区域，分别在各区域内拟合曲线。

选取焊接之前的焊缝图像，由于焊接还没有开始，拍摄图像的光线主要来自于自然光，所以图像的质量变化较大。尤其是 V 形坡口底线在图像中显示为类似坡口边缘的灰度变化趋势，但这种趋势是两个斜坡的交界，而焊缝坡口边缘是一个灰度渐变斜坡。用分形理论的图像处理方法处理图像的结果表明，检测的模糊区域包括了足够的边缘信息，排除了焊道内外所有的干扰。在边缘检测的时候，根据边缘情况设定边缘线的多项式方程，对直焊缝，可以设置边缘线为直线。实验结果如图 5.3-52 所示。图 5.3-52a 是没有焊接之前的图像，图 5.3-52b 的黑色小方块是检测到的焊缝模糊边界，虽然模糊边界没有覆盖整个边缘区域，但这并不影响边缘检测的精度，相反还可以节省检测的时间。图 5.3-52c 是识别出来的焊缝边缘。

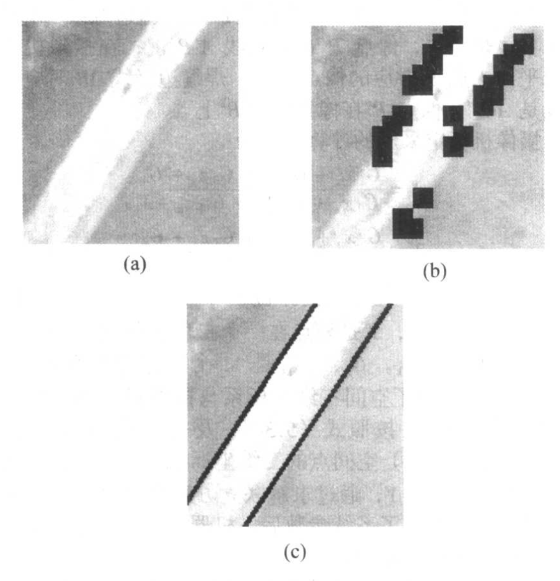


图 5.3-52　焊前焊缝图像处理

对于焊接过程中的焊缝图像，图像质量与焊前图像有所不同。由于在焊接时焊缝的光照主要来自于焊接弧光，而自然光的影响很小，所以图像质量比较稳定。此外，在焊接时，图像中还有飞溅、烟尘等干扰，尤其是飞溅会影响用传统图像处理方法的处理结果。而焊接干扰信息的分形参数与焊缝边缘的分形参数有很大的区别，据此可以将模糊边界区域与飞溅干扰等区分开来。焊接过程中的焊缝图像处理结果如图 5.3-53 所示，图 5.3-53a 为焊缝图像原图，图 5.3-53b 白色小方块是用分形方法检测到的模糊边界区域，其中包含了大部分坡口边缘信息，图 5.3-53c 为检测到的焊缝边缘。这里假定焊缝边缘满足直线方程。

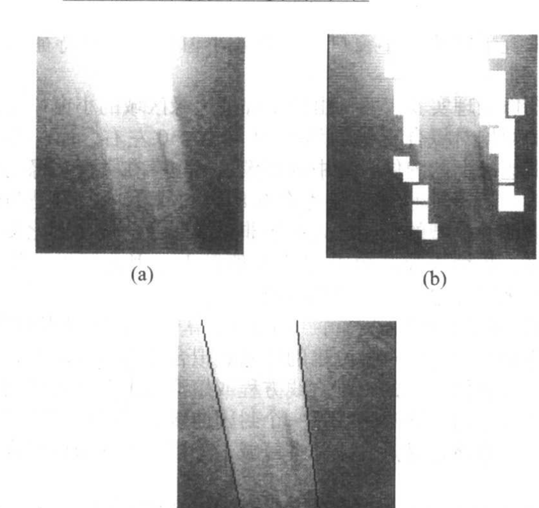


图 5.3-53　焊接过程中的焊缝图像处理

(2) 基于直线-点匹配法的焊缝图像三维坐标识别

经典的计算机三维视觉重构采用两个图像平面上特征点匹配法确定对象的三维坐标，对于焊缝来说，坡口边缘内外不存在明确的特征点，所以无法使用特征点匹配法。针对在局部图像窗口中，焊缝可以近似为直线段的特点，为此设计了一种简化的特征匹配算法来计算焊缝三维坐标，并通过人工神经网络提高了精度和速度。

下面以图 5.3-54 说明直线-点匹配法重构点的三维坐标的方法。设 P 是空间焊缝边缘线 AB 上的任一点，在摄像机 1 的成像平面中点 P 对应的像点是 P'，焊缝边缘线 AB 对应的像直线是 $A'B'$，像点 P' 在像直线 $A'B'$ 上；在摄像机 2 的成像平面中点 P 对应的像点是 P''，焊缝边缘线 AB 对应的像直线是 $A''B''$，像点 P'' 在像直线 $A''B''$ 上。

摄像机标定采用的计算公式为：

$$X=\frac{G_1x_a+G_2y_a+G_3z_a+G_4}{G_9x_a+G_{10}y_a+G_{11}z_a+1} \quad (5.3\text{-}3)$$

$$Y=\frac{G_5x_a+G_6y_a+G_7z_a+G_8}{G_9x_a+G_{10}y_a+G_{11}z_a+1} \quad (5.3\text{-}4)$$

在式 (5.3-3) 及式 (5.3-4) 中，x_a，y_a，z_a 是空间一点的三维坐标，X，Y 是该点在一个摄像机的图像平面上像点的二维坐标。G_1，$G_2 \ldots G_{11}$ 是 11 个可标定的系统参数，这 11 个参数确定了空间三维坐标系与摄像机二维图像坐标之间的对应关系。按照式 (5.3-3) 及式 (5.3-4)，当已知若干个（至少 6 个）空间点的三维坐标 x_a，y_a，z_a，及其对应的图像坐标 X、Y，通过求解联立方程组可以确定标定参数。反之，当标定了系统参数后，机器视觉的任务就是要从 X、Y 中计算出空间坐标 x_a、y_a、z_a。

在图 5.3-54 中，不难求得像直线 $A'B'$ 和 $A''B''$ 的二维直线方程为：

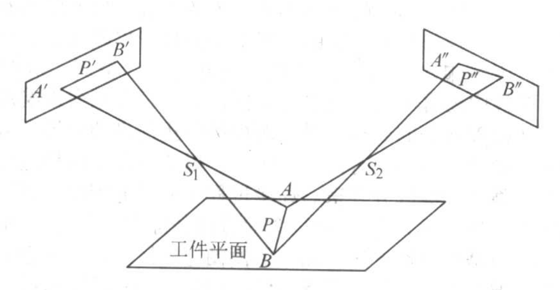


图 5.3-54　直线－点匹配算法焊缝立体成像模型

$$A'B':\ A_1X+B_1Y+C_1=0 \quad (5.3\text{-}5)$$

$$A''B'':\ A_3X+B_3Y+C_3=0 \quad (5.3\text{-}6)$$

若令 P 的空间坐标为 $(x_a,\ y_a,\ z_a)$，根据式 (5.3-3) 和式 (5.3-4)，相对两个摄像机 P 点的图像坐标与空间三维坐标的关系可以分别表示为：

$$CCD_1:\ X_p^{(1)}=f_x^{(1)}(x_a,\ y_a,\ z_a) \quad (5.3\text{-}7)$$

$$Y_p^{(1)}=f_y^{(1)}(x_a,\ y_a,\ z_a) \quad (5.3\text{-}8)$$

$$CCD_2:\ X_p^{(2)}=f_x^{(2)}(x_a,\ y_a,\ z_a) \quad (5.3\text{-}9)$$

$$Y_p^{(2)}=f_y^{(2)}(x_a,\ y_a,\ z_a) \quad (5.3\text{-}10)$$

式 (5.3-7) ～ 式 (5.3-10) 具有与式 (5.3-3) 和式 (5.3-4) 同样的形式。在焊缝边缘线 AB 上任取一点 P_1，则 P_1 在 CCD_1 图像中的像点 P'_1 在像直线 $A'B'$ 上，且 P'_1 的二维坐标满足式 (5.3-7) 和式 (5.3-8)。在 CCD_2 的图像中与 P'_1 对应的像点 P''_1 在直线 $A''B''$ 上，要求点 P_1 的空间坐标，可将式 (5.3-9) 和式 (5.3-10) 代入 $A''B''$ 的二维直线方程，即式 (5.3-6)，得到：

$$A_3f_x^{(2)}(x_a,y_a,z_a)+B_3f_y^{(2)}(x_a,y_a,z_a)+C_3=0 \quad (5.3\text{-}11)$$

联立方程式 (5.3-7)、式 (5.3-8) 和式 (5.3-11) 可以解出 P_1 点的空间坐标。根据需要还可在 AB 上再任取第二点 $P_2 \neq P_1$，则可用同样的方法求得 P_2 点的空间坐标，再由两点定直线的关系可求出空间直线 AB。

直线－点匹配法利用焊缝边缘的直线特征，避免了传统的点－点匹配法计算空间坐标时难匹配的问题。用此方法可以得到焊缝边缘线上的任意点的三维坐标。在此基础上开发了一套基于双目立体视觉的机器人路径规划系统，该系统将双目摄像机安装在机器人的末端执行器上，使其能跟随焊枪沿焊缝走向一起移动，采用自然光作为视觉系统的光源。对于曲率不大的曲线可以分割为足够小的直线时，该系统可以实现对直线和曲线焊缝的路径规划。

(3) 机器人全位置的焊缝空间位置的检测与焊炬姿态的规划

焊缝空间位置的检测与焊炬姿态的规划是影响机器人全位置自动焊接质量的重要因素。全位置焊接中焊枪相对焊缝的姿态是控制熔池现状的重要参数，通过图像视觉可以对机器人焊枪姿态进行检测。以焊枪轴线的延长线与焊缝的交点为公共原点，建立两个运动坐标系，见图 5.3-55。运动坐标系 1 建立在焊枪上，以焊枪为 Z_1 轴，此坐标系随机器人焊枪的运动而运动；运动坐标系 2 建立在工件上，以焊缝所在工件平面的法线为 Z_2 轴，沿焊接方向的焊缝为 X_2 轴，此坐标系随运动坐标系 1 的移动而作相应移动。在坐标系 1 中 [见图 5.3-56 (a)]，焊缝相对于运动坐标系 1 各轴的夹角可用三个方向角 α_1、β_1、γ_1 确定。但是这三个角度还不能反映焊枪所处的焊接位置。所以，在运动坐标系 2 中 [见图 5.3-56 (b)]，可用三个方向角 α_2、β_2、γ_2 来表示焊枪相对于坐标系 2 各轴的夹角。其中 γ_2 是焊枪与工件平面法线的夹角。

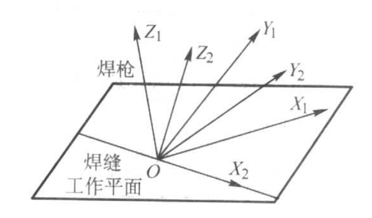
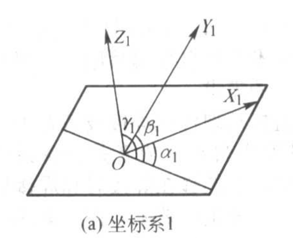
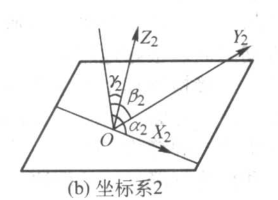


图 5.3-55　空间坐标系

由于运动坐标系 1 建立在机器人焊枪上，所以根据机器人当前各轴的转角通过坐标转换，可以建立运动坐标系 1 与机器人基坐标系（固定坐标系）的关系，这样就能把在运动



(a) 坐标系1



(b) 坐标系2

图 5.3-56 焊枪姿态参数显示

坐标系 1 中的工件平面法线向量和焊接方向向量变换到机器人的基坐标系中。有了这两个向量在机器人基坐标系中的向量表示，就可以确定当前工件处于平焊、立焊、仰焊或其他焊接位置，再根据焊枪优化姿态数据库提供的数据，适当调整焊枪相对于焊缝及工件的位置角度，即调整 α_1、β_1、γ_1、α_2、β_2、γ_2，使焊枪保持适当的焊接姿态。

一条焊缝边缘线在两个 CCD 摄像机中可分别获得直线图像；设在各图坐标系中的直线方程为：$A_1 i_1 + B_1 j_1 + C_1 = 0$；$A_2 i_2 + B_2 j_2 + C_2 = 0$；这也可看作为焊缝边缘线与两个 CCD 摄像机的光心构成两个空间平面，它们交线就可获得该边缘线的空间方程。用摄像机位姿参数关系方程消去 i_1、j_1、i_2、j_2 后，可以计算出运动坐标系 1 中焊缝边缘线的空间直线方程：$(x - x_1)/l = (y - y_m)/m = (z - z_n)/n$，式中，$l = \cos(\alpha_1)$、$m = \cos(\beta_1)$、$n = \cos(\gamma_1)$，其中 α_1、β_1、γ_1 即为运动坐标系 1 的三个轴与边缘线的夹角。

类似的，可以计算出 V 形坡口另一条边缘线。然后把得到的两条空间直线方程按实际情况分为平行、相交、异面三种情况，利用空间解析几何的原理和“直线－点”匹配法，可以计算出在运动坐标系 1 中的焊接方向向量和工件平面的法线向量，从而可以计算出姿态角 α_2、β_2、γ_2。

在研制开发成功的焊炬位置和焊炬姿态自动识别调整系统中（见图 5.3-57），利用分形理论有效地排除飞溅、锈斑等因素的干扰，结合数学物理模型，较经典的边缘检测算法在速度和精度上都有了很大的提高，实现了对任意焊缝的三维空间描述。同时，借助于大量实验得出不同焊炬姿态对应的焊接规范数据库，使得机器人在任意空间位置焊接时，保持最优的焊炬姿态及焊炬规范参数，保证全位置焊接中焊缝成形的稳定、美观。



图 5.3-57 焊炬姿态规划系统界面

1.4.2 加拿大 SERVO－ROBOT 公司产品简介

在焊接过程中，对焊缝的实时跟踪首先由传感器检测到焊缝的位置，然后引导自动化焊接设备，如焊接机器人或者多轴焊枪定位系统进行焊接。传感器将焊枪与焊缝轨迹的偏差量传送给机器人，从而使焊枪中心在焊接时保持在最优位置。高精度的跟踪大大地缩短了操作者进行监控的工作量，提高了焊接速度，降低了设备成本，从而提高了焊接生产率。这种工艺已经被运用在机器人对汽车车身的焊接以及自动化的管道焊接中，同时，在诸如弧焊和激光焊接的诸多领域都有广泛应用。

1）弧焊自适应跟踪控制系统　成功的电弧焊需要保持焊枪和焊缝间的偏差量最小。实时焊缝跟踪能够对工件变形以及装夹定位所带来的焊缝偏差量予以修正。高精度的跟踪大大地缩短了操作者进行监控的工作量，提高了焊接生产率。这种跟踪方法提高了焊接速度，降低设备成本和焊接材料的用量。此外，由于焊枪和焊缝之间保持了正确的位置关系，因此诸如焊接电流和焊接速度等焊接参数能够通过自适应控制系统得到实时的调节。焊缝跟踪自适应控制系统已经被用在汽车车身、建筑、管道等的焊接上。跟踪系统能够与机械，自动化以及机器人等设备一起使用。

手工焊接过程中，焊缝跟踪通过焊工的眼睛来完成。当使用机器人或者特殊的焊接设备时，一个激光传感器被安装在焊枪的前端，通过自动滑块以控制焊枪的位置，或者通过数字化的界面能够直接控制焊接机器人，见图 5.3-58。Servo－Robot 被视为是这一领域的开拓者和先导，其激光视觉传感系统和激光传感器代表着这一领域的最新成就。

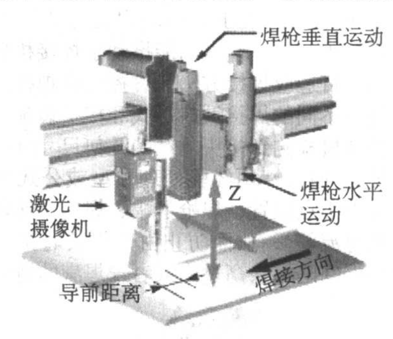


图 5.3-58 机器人焊缝跟踪系统示意

弧焊自适应跟踪控制系统由激光－摄像机、控制单元、定位系统和软件组成。一个可靠的和鲁棒性好的激光传感器或者激光－摄像机是该系统的主要部分。它被设计成能够接近焊接电弧或者激光束。这个摄像机并不妨碍焊枪的可达性。它能够检测接头的位置、方向以及从白亮的薄板到厚板的不同类型接头的几何参数，同时还包括图 5.3-59 所示的各型铝合金的接头形式。图 5.3-60 所示为用来计算接头几何参数的激光三角测量原理，Servo－Robot 上的激光－摄像机正是基于这样的原理。计算机控制单元为激光传感器或摄像机供电，并且与包括焊机、机械臂、安全设施等外围设备通讯。它包含功能强大的处理器，能够完成摄像机的控制算法接头几何参数位置（方向）的计算。为某一应用选择跟踪系统必须保证所选择的控制算法能够提供独立于接头曲率、焊接速度或接头表面条件（亮度和铁锈等）的最高跟踪精度，同时还要补偿激光－摄像机和焊接位置的距离。Servo－Robot 开发了所有必需的软件和算法，使其适用于包括高速双丝 GMAW/MIG－MAG 和埋弧焊、电流从几安到 1 000 A 以上的不同场合的焊缝跟踪。该软件允许的焊接速度达每分钟

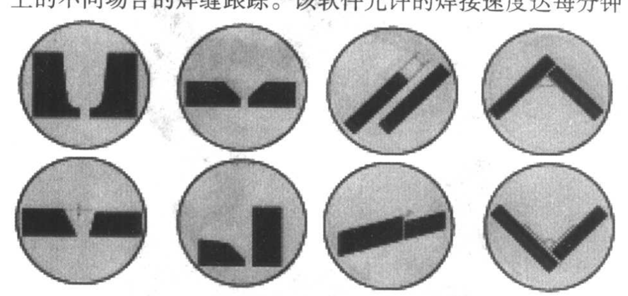


图 5.3-59 各型铝合金的接头形式

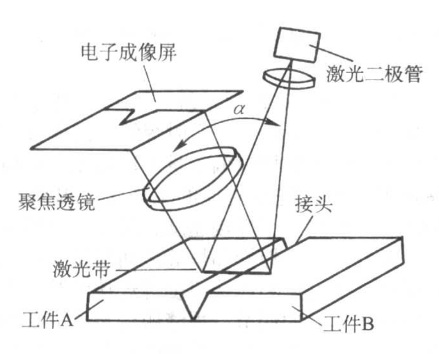


图 5.3-60　激光三角测量原理

数米，可以满足高质量焊接对电极位置精度的高要求。Servo－Robot公司生产了带有交流或直流电机和控制单元的精确定位滑块。这些滑块被集成在焊接专机或者焊接机器人上。这种精确定位滑块在行程、有效载荷以及尺寸上是不同的，可以适应于SAW、FCAW、GMAW、GTAW、PAW以及高速双丝的MIG焊接。

Servo－Robot公司开发出自适应焊接方法以提高焊接质量和效率。焊缝跟踪这一基本功能推动了焊接机器人以及焊接专机的使用，自适应焊接方法能够控制在焊接过程中调节焊接参数以适应不同的焊接坡口形式和接头装配。在此过程中，激光－摄像机检测到接头的精确几何尺寸（间隙、横截面积、错位等）。通过运用经验处理模型或公式调整焊接工艺参数（焊缝中心点位置、焊枪摆幅、焊速、送丝速度、电弧电压，焊接电流等），从而防止由于焊接时接头几何尺寸变化导致的焊接缺陷、余高过高或者未焊满的情况的产生。

自适应焊接的软件如ADAP是Servo－Robot公司独一无二的产品，它能够使焊接工程师和技术人员自行编写用户方程和查询桌面以很好地适应用户自身的需求。

焊接检测和工艺生产率的监控对现代化焊接设备尤为关键。在这方面，Servo－Robot开发出自动的或者是特殊设计的手持式焊缝检测系统，从而提供了能够在焊接时和焊接后自动检测焊缝尺寸的解决方案。这种生产效率监控方案保证了各部件的一致性，可溯性，而对缺欠的检测可以防止代价高昂的修补工作，减少了不必要的焊接，提高了整体的质量。图5.3-61所示为由Servo－Robot检测系统生成的焊接接头的三维造型。

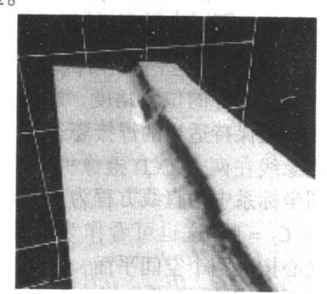


图 5.3-61　检测到的焊接接头三维造型

2）数字化焊接过程控制系统（DIGI－1系统）　该系统使用一种综合技术来保证全过程的监控和焊接质量控制，包括焊缝形貌、焊道几何形貌、电弧声音和熔池几何形貌等的监控，见图5.3-62。DIGI－I系统适用于从金属薄片到金属厚板的各种焊接过程。



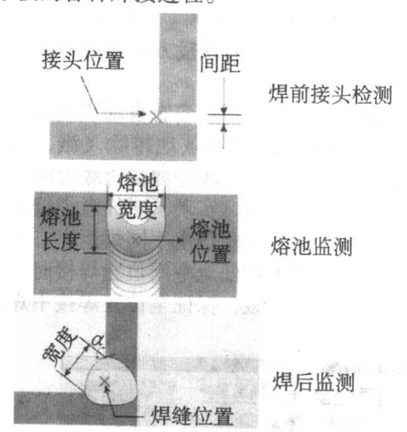


图 5.3-62　数字化焊接过程控制系统（DIGI－I）及其应用

3）机器人焊接焊缝识别系统　由激光摄像机和传感器等组成，可用于重复性、短距离焊缝焊接时的焊缝识别（此时沿焊缝方向的焊缝走向变化量很小），及焊缝、接头和工件的非接触定位。Servo－Robot公司的SENSE－i时一个高精度的光学深度测量系统（见图5.3-63）。它的独特设计和抗强光能力使其可以用于焊接机器人或设备的焊枪位置修正或其他需要高精度深度检测的应用。

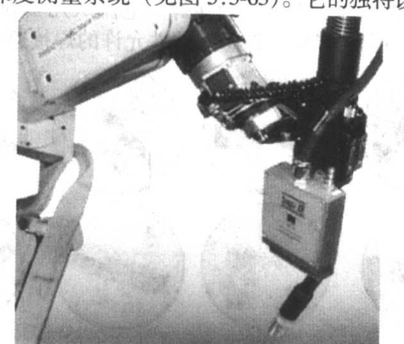


图 5.3-63　机器人焊接焊缝识别系统

4）MX/ST焊缝和工件快速定位系统　该系统是为机器人在不同生产应用中提高精度而设计的非接触式焊缝和工件定位测量系统（见图5.3-64）。工件定位公差和空间变化是机器人应用中的主要问题，往往导致很高的工件不合格率，从而降低生产率，增加停工期。MX/ST定位系统可以保证产品质量。系统获得的空间数据可以提供给机器人，使其对每个工件在0.1 s内完成对其编程路径的修正。该系统可以通过I/O口或数字串行通讯口很方便的与主机器人连接。MX/ST定位系统可以工作于焊接、切割、封头等机器人应用场合，完全适应恶劣的工作环境。与焊缝跟踪一样，焊缝识别或三维机器人路径变换采用激光－摄像机来修正焊接或连接过程开始前编制的机器人程序或过程参数。例如在铝的电弧焊时，焊缝位置、错边和间隙可以在0.1 s内完成校核，该信息传给机器人改变其程序并调整相关的过程参数以避免昂贵的维修工作。在强大的程序库的支持下，系统可以识别焊



缝几何形貌、测量接头位置和走向、以及焊缝的其他相关几何特征（如截面积、间隙等）。A.R.T. 消除反射技术使得MX/ST定位系统可以完全避免各种反射问题，比如应用于光亮的镀锌钢时可能导致的激光－摄像机崩溃。

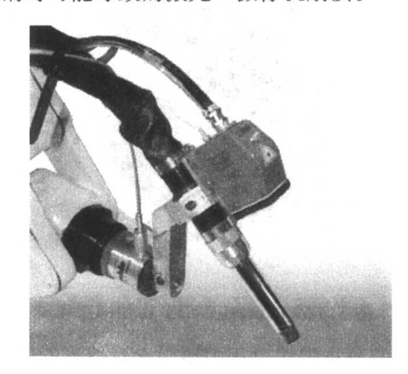


图 5.3-64 MX/ST 焊缝和工件快速定位系统

5）激光焊焊缝跟踪系统 与一般焊接过程相比，激光焊要求更高的精度和速度，焊接速度可能高达 15 m/min，而激光焦点的精度要好于 100 μm。Servo－Robot 提供的跟踪系统通过附加激光－摄像机和十字滑块可以保证最佳的焊接位置，见图 5.3-65。焊缝实时跟踪是通过激光－摄像机在焊前和焊接过程中检测焊缝位置，并将位置控制数据传送给机器人或特殊用途的多轴自动化焊接设备来实现的。传感器与机器人实时通讯传送路径修正量，以保证激光焦点位于焊缝的最优位置（见图 5.3-66）。自适应焊接与焊缝跟踪同步进行。在焊缝识别和跟踪过程中，传感器观测焊缝几何特征（如待焊焊缝的间距宽度或错边等），然后将这些信息传递给系统控制器，计算最优焊接参数。例如，激光视觉系统将焊接速度作为焊缝间距的函数自动调整，或在焊缝错边时自动将激光焦点偏移。该系统可用于白车身焊接或焊接过程监控。



图 5.3-65 激光焊焊缝跟踪系统

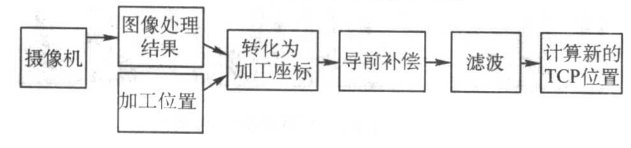


图 5.3-66 激光焊焊缝跟踪系统工作原理

2 焊缝成形质量控制技术及其应用

焊缝成形的质量控制分为熔滴控制技术、熔池几何形状检测与控制技术、热输入控制技术、熔深检测与控制技术及焊接过程综合性能评价技术等，下面分别予以介绍。

2.1 焊接熔滴控制技术研究进展

焊接成形精确化、生产自动化和焊接过程控制智能化是焊接技术发展重要方向。对于生产效率高、应用广泛的熔化极电弧焊，熔滴形状和尺寸是影响焊接工艺性能和焊缝质量极为重要的因素。

1）熔滴尺寸及其过渡方式决定着电弧的热输入，热输入的大小不仅影响焊丝及母材的熔化，还关系到焊丝和熔池中微量元素及合金元素的烧损，直接影响焊缝的微观组织。

2）熔滴尺寸的大小直接影响电弧形态和比热流分布。熔滴尺寸影响电弧的温度分布、导电情况以及阳极区域的收缩程度，从而影响工件的比热流分布以及焊缝的熔宽和熔深，直接影响与焊缝尺寸直接相关的焊接缺陷、应力和焊缝的承载能力。

3）熔滴尺寸及过渡的均匀性还影响焊接飞溅的大小，焊接飞溅不仅关系到焊缝及工件的表面状态，还将因增加清理工时而降低生产效率。

4）熔滴尺寸及其过渡方式还影响工艺的适用范围，包括对不同焊接位置的适应性，确定规范参数下能够焊接的板厚范围等。

因此，作为控制焊缝组织、成形以及提高焊接工艺性能及焊缝质量的根本手段，控制熔滴尺寸及其过渡方式一直是熔化极电弧焊追求的目标和研究的热点。

鉴于熔滴形状和尺寸对焊接工艺性能及焊缝质量的重要作用，国内外的学者对焊接熔滴及其控制进行了大量的研究与探索。

2.1.1 CO_2 短路过渡焊接 STT 表面张力过渡技术及应用

CO_2 气体保护焊是 20 世纪 50 年代初期发展起来的一种焊接方法，因其具有高效节能、抗锈低氢、成本低、变形小、便于实现半自动和自动化焊接、全位置焊接适应性好及可焊工件厚度范围宽等诸多优点，得到了普遍重视和广泛应用。

短路过渡是 CO_2 气体保护焊最常用的一种熔滴过渡形式，广泛应用于中、薄板钢结构的焊接和大型组合钢构件的全位置焊接。在我国的 CO_2 气体保护焊中，有 85% 属于短路过渡焊接。但是长期以来，CO_2 短路过渡焊接还存在着两大问题未能很好的解决。其一是由于周期性的短路过程，降低了电弧对母材的热输入，导致母材熔化不足，焊缝成形不好；其二是由于短路电流的加热作用导致“电爆炸”，产生大量的金属飞溅。飞溅的产生不仅降低了金属敷熔效率，增加了焊丝消耗量，而且恶化了焊工的工作环境，有时还需要在焊后清理工件，降低了生产效率。研究表明 CO_2 短路过渡焊接飞溅主要有以下几种形式：短路初期“瞬时短路”产生的飞溅、短路末期短路液桥缩颈“电爆炸”产生的飞溅、“固体短路”现象产生的飞溅、燃弧初期电弧冲击作用产生的飞溅、燃弧后期“斑点力”引起的大滴飞溅等。

为降低 CO_2 短路过渡焊接过程中的金属飞溅、改善其焊缝成形，国内外学者开展了大量的工作，取得了一定的进展。如从焊接材料角度出发，采用 $Ar+CO_2$ 混合气体保护或含有活性物质的焊丝。从送丝方式角度出发，采用脉冲送丝或配合送丝的方法。从焊接电源角度出发，寻求合理的焊接电压输出特性。其中较为成功并形成广泛产品的是美国 Lincoln 电气公司的 Elliot K.Stava 于 1993 年提出了利用短路末期短路液桥受到的表面张力实现短路过渡以减少飞溅的表面张力过渡（STT，Surface Tension Transfer）方法。

STT 表面张力过渡方法的电流电压波形如图 5.3-67 所示。t_0-t_1 阶段：燃弧基值电流为 50～100 A，它在焊丝末端形成并维持一个 1.2 倍于焊丝直径的球状熔滴，以防止熔滴尺寸太大或太小。t_1-t_2 阶段：当熔滴接触到熔池发生短路时，焊接电流迅速下降到 10 A，并在 10 A 下停留 0.75 ms，让熔滴在熔池表面浸润、充分铺展，防止“瞬时短路”飞溅的产生，并在焊丝与熔池之间形成短路液桥。t_2-t_3 阶段：



短路电流按一定斜率上升到一个较大的电流值，这个大电流产生的较大的轴向电磁收缩力作用于短路液桥上，使液桥发生收缩，产生缩颈；缩颈的产生改变了液桥的截面积，增大了液桥电阻。STT电源实时检测反映液桥电阻变化过程的液桥两端电阻电压变化率，当液桥收缩到一定程度时，电压变化率达到某一设定值，电源迅速将焊接电流降低到50 A。t_3-t_4阶段：液桥在表面张力及较小的电磁收缩力作用下，继续收缩，缩颈在很小的几何截面下爆断，降低了短路液桥缩颈"电爆炸"产生的飞溅。t_4-t_5阶段：液桥爆断后电压上升，但电流仍然维持在较低水平，可以减少燃弧初期电弧冲击作用产生的飞溅。t_5-t_6阶段：此时施加一个1～2 ms的大电流等离子助推过程，以增加燃弧能量和焊缝熔深。t_6-t_7阶段：燃弧脉冲结束后，又回到了t_0-t_1阶段。

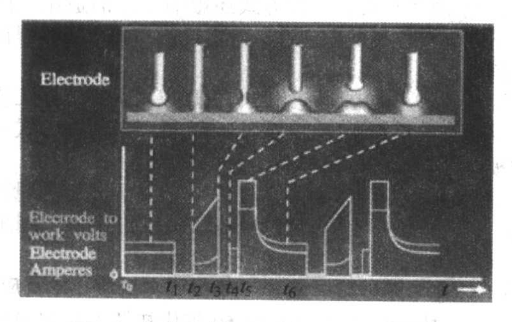


图5.3-67　STT控制法电流、电压波形图

基于上述STT表面张力过渡理论，Lincoln电器公司利用逆变焊机的高速可控性，采用波形控制技术研制了一系列的STT型焊接电源（见图5.3-68、图5.3-69）。此类焊接电源在一个过渡周期内根据不同电弧电压值（电弧状态）输出不同的焊接电流，其主要优点为：焊接过程稳定（干伸长度变化影响小），显著地降低了飞溅，减轻了焊工的工作强度；焊缝成形美观；电弧产生的辐射和烟雾较少；可降低小尺寸工件的热输入量。



图5.3-68　Power Wave 455M STT型焊接电源

目前，STT型焊接电源已经为国内许多企业引进，并成功应用于在国内外许多工程项目中。如在苏丹Muglad盆地石油开发项目管道系统焊接施工中，中国石油天然气管道局引进了STT型CO_2半自动焊接技术，在双联管工艺的打底焊中取得了较好的效果。在"西气东输"工程的中则采用了美国Lincoln电器公司生产的适宜于全位置根焊的STT Ⅱ型电源。在建造的渤海绥中36-1二期中心导管架中，也采用了STT焊接新技术。

2.1.2　MIG焊熔滴过渡控制技术

针对尺寸相对规则的MIG焊熔滴的实验研究工作大致分为如下两个方面。



图5.3-69　Invertec STT Ⅱ型焊接电源

一是实验分析焊接过程中诸因素对熔滴的影响规律，寻求有利于减小熔滴过渡随机性的规范参数范围：S.Rhee利用高速摄像分析了焊丝干伸长度、保护气体成分对熔滴直径、过渡模式及过渡频率的影响。S.Subramaniam等则通过高速拍摄熔滴图像研究了脉冲MIG焊（GMAW-P）中脉冲熔滴与脉冲参数间的关系，研究了"一脉冲一滴（ODPP）"的参数范围及滴状过渡向喷射过渡转变的条件。

二是尝试熔滴的实时闭环控制：某文献研究了MIG焊熔滴受激过渡的控制方法。通过峰值电流向基值电流的快速切换来激励熔滴的分离，随即监测熔滴的运动，在检测到熔滴下端具有快速与熔池接近的趋势时，迅速将焊接电流由基值切换至峰值，使熔滴在下向动量及强电磁收缩力的作用下脱离焊丝端部，由于利用了熔滴向下运动的动量，因而无需传统脉冲MIG焊接方法中迫使熔滴脱离焊丝的大电流，避免了焊接过程中熔滴随机过渡现象出现，见图5.3-70、图5.3-71。

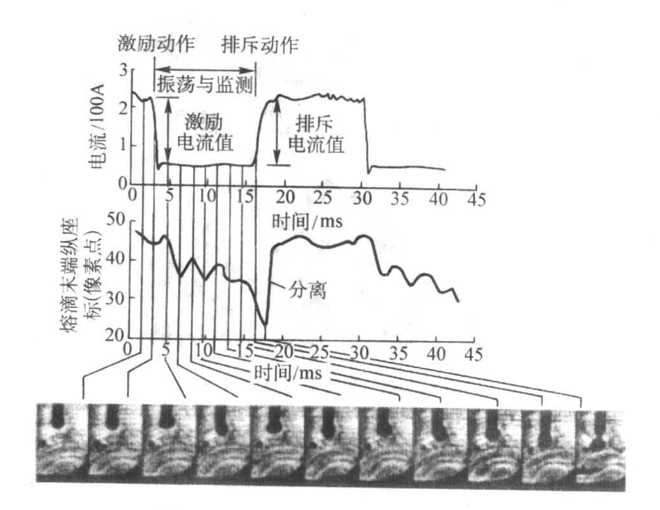


图5.3-70　MIG焊熔滴的激励过渡控制

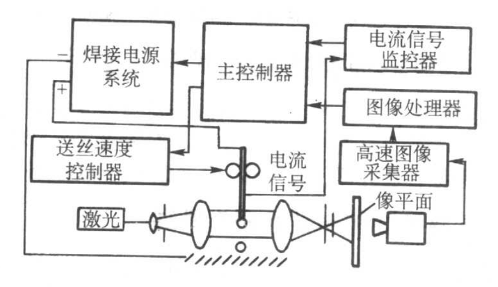


图5.3-71　MIG焊熔滴受激过渡控制系统原理



GMAW焊接时在熔滴的电弧根部形成能够发射弧光的金属蒸气源。当缩颈破裂之后，覆盖整个熔滴根部的弧光立即熄灭，跳到焊丝的新顶端，这大大减小了电弧发射光通量。熔滴过渡后，弧光通量增加。基于这一现象，哈尔滨工业大学利用光电传感器检测脉冲GMAW焊接过程中电弧光通量的改变，来检测熔滴过渡，在此基础上可实现“一脉冲一滴”的闭环控制，见图5.3-72。

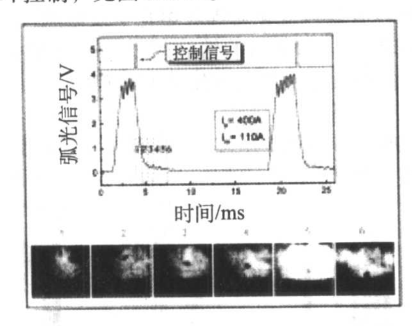


图5.3-72 基于弧光传感的MIG焊熔滴控制

上述控制方法，就其研究的实质可以看出，它们主要是立足于熔滴过渡的控制，提高熔滴过渡的规则性，而并非针对熔滴尺寸控制的研究。

2.1.3 CO_2 短路过渡焊熔滴尺寸检测与控制

短路 CO_2 焊接熔滴形状及尺寸是影响焊接工艺性能和焊缝质量的重要因素。

短路过渡焊接是燃弧与短路交替进行的周期性过程，在燃弧过程中，由电弧热熔化焊丝，并在焊丝端头形成熔滴，随着熔滴的不断长大及焊丝的持续送进，熔滴与熔池接触短路并完成向母材的过渡。

从短路过渡焊接过程看，熔滴的形成不仅取决于贯穿于非短路过渡方式的燃弧过程，而且要受到短路过渡过程的影响。由于短路过渡过程受熔池状态、焊接速度、送丝速度、短路前的熔滴尺寸等多方面因素的影响，并且在稳定的焊接过程中，燃弧与短路阶段能量及时间的分配又必须满足一定的约束条件，因此，相比于非短路过渡方式，短路过渡焊接过程中熔滴影响因素多，相互关系复杂，控制也相对困难。

为了分析影响熔滴尺寸的因素和规律，了解熔滴控制效果，为此将高速摄像与电弧信号同步采集相结合，建立了以He-Ne激光器为背光照明的熔滴尺寸与电弧信号高速摄像研究系统（见图5.3-73)。高速摄像机以955帧/s的速度，每次连续拍摄8 000帧熔滴图像。通过对熔滴尺寸与电弧信号相关参数的动态分析，发现短路前熔滴体积及燃弧能量的随机性分布是造成熔滴尺寸不均匀分布的重要原因，基于对熔滴形状和尺寸主要取决于焊接过程中力和热作用的认识，分别建立了熔滴的力学和热学模型，依据模型，提出了在焊接过程的不同阶段相对独立地控制力和热，通过控制力提高焊丝端部残余液态金属的一致性，通过控制热调整燃弧阶段的焊丝熔化量，进而控制熔滴尺寸的思想。

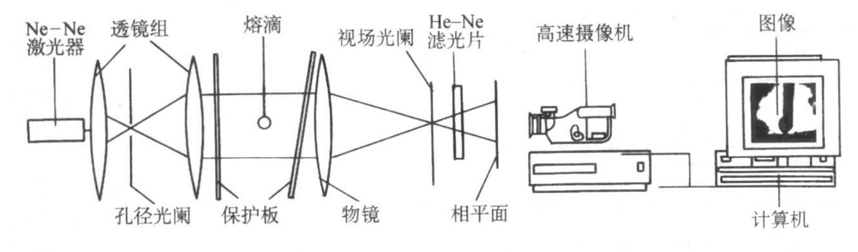


图5.3-73 熔滴高速摄像研究系统

(1) 熔滴尺寸传感

选择简便合理的熔滴尺寸传感量是实现熔滴尺寸闭环控制的前提和关键，在周期性的短路过渡焊接过程中，能够反映熔滴尺寸的信息，主要分为几何参量、时间参量和电参量三类。

1) 几何参量　根据熔滴尺寸定义，直接检测短路前的熔滴径向最大直径 D 及（或）形状系数 θ，当然最能反映熔滴大小；然而熔滴几何尺寸的直接检测不仅需要附加的光学装置及图像处理单元，还需要有效地抑制燃弧阶段强烈电弧光干扰的措施。因此，直接检测熔滴尺寸进而实施闭环控制的方法将不可避免地增加系统的成本、体积以及技术上的难度，直接影响系统的实用性能。

2) 时间参量　短路过渡焊接过程中，最主要也是最直接的时间变量是短路持续时间 T_s、燃弧时间 T_a 及短路过渡周期 T_w。传统恒压特性电源短路过渡焊接过程中，这些变量与单个的熔滴尺寸不存在明显的对应关系，但是都具有正态分布的特征。通过电流波形控制可以减小这些变量与熔滴尺寸的分散性。

3) 电参量　在恒定的焊接电流下，电弧电压对应于一定的电弧弧长，因此，短路结束瞬间的电弧电压实际上就对应于此时焊丝端部至熔池的距离 H。而 H 在几何上具有承上启下的特征，它既反映了上一个熔滴形成的短路液桥缩颈破断的部位，又在一定程度上反映了下一个熔滴能够长大的电弧空间。

统计分析表明短路持续时间 T_s、燃弧时间 T_a 及短路过渡周期 T_w 以及短路结束瞬间的电弧电压可以用来表征熔滴尺寸的均值大小，能够用于熔滴尺寸均值的反馈控制。但是考虑到以统计平均值作为反馈量将可能导致较大的时间滞后，影响控制系统的实时性。进一步分析这些变量在每个过渡周期内与熔滴尺寸的对应关系表明：熔滴尺寸与其对应的再燃弧电压具有良好的相关性，再燃弧电压能够作为逐个熔滴尺寸控制的反馈量；尽管与单个熔滴尺寸对应的过渡周期具有一定的随机性，然而当选取适当数目的样本数目时，过渡周期均值与熔滴尺寸均值却具有较好的相关性，过渡周期的均值可作为熔滴统计平均尺寸控制的反馈量。

(2) 熔滴尺寸控制系统

而对于短路过渡焊接的熔滴形成过程，有些环节难以建立其精确的数理模型，因此，如何结合短路过渡焊接工艺以及传感变量的特点，建立易于实现、能够提高静动态及抗干扰性能的系统，从手段上保证系统满足焊接过程中熔滴尺寸实时控制的要求，是熔滴尺寸控制的关键。

某文献建立的熔滴尺寸控制系统框图如图5.3-74所示，其中 $L(s)$ 为焊丝干伸长扰动，U_g 为熔滴尺寸给定值，U_0 为再燃弧电压设定值，T_1 为燃弧电流脉冲宽度，U 为再燃弧电压，T_w 为短路过渡周期，T_g 为期望的熔滴尺寸 U_g 的短路过渡周期，V 为熔滴尺寸，$G_1(S)$ 为常系数比例环节，$G_2(S)$ 为燃弧电流脉冲参数影响焊丝熔化量的环节，$G_3(S)$ 为干伸长电阻热变化对熔滴尺寸的影响环节，$G_4(S)$ 为熔滴尺寸给定与短路过渡周期均值转换环节，$G_5(S)$ 为短路过渡周

期均值计算环节，$G_6(S)$为干伸长变化影响燃弧电流参数的前馈控制环节，$G_7(S)$为常系数比例环节。该系统集成了控制逐个熔滴尺寸的再燃弧电压负反馈、控制熔滴尺寸的短路过渡周期统计平均负反馈、焊丝干伸长变化前馈等功能。

1）再燃弧电压负反馈控制　如图5.3-74所示的熔滴尺寸控制系统中，再燃弧电压负反馈控制回路由$G_1(S)$、$G_2(S)$、$G_3(S)$、短路过渡四个环节组成。其工作原理为：系统检测每次短路结束瞬间的电弧电压U，根据其与设定值U_0的差值快速调整燃弧脉冲时间T_1，使紧随其后的熔滴尺寸D得到调整，以期该熔滴短路过渡后的再燃弧电压U能够逼近设定值U_0。由于燃弧脉冲电流宽度T_1是根据上一个熔滴尺寸的信息而获得的，并且在下一个熔滴形成之前已经完成了燃弧能量的调整，因此再燃弧电压负反馈控制可以完成熔滴尺寸逐个周期的调整，从控制手段上抑制随机干扰对熔滴尺寸的影响，进而保证熔滴尺寸控制的实时性。在熔滴形成过程中，当干伸长电阻热波动引起熔滴尺寸变化时，熔滴短路过渡结束后，再燃弧电压的变化将改变形成下一个熔滴的燃弧脉冲电流时间，熔滴尺寸可得以恢复，由此表明系统对长时缓慢类的扰动也具有一定的抑制能力。

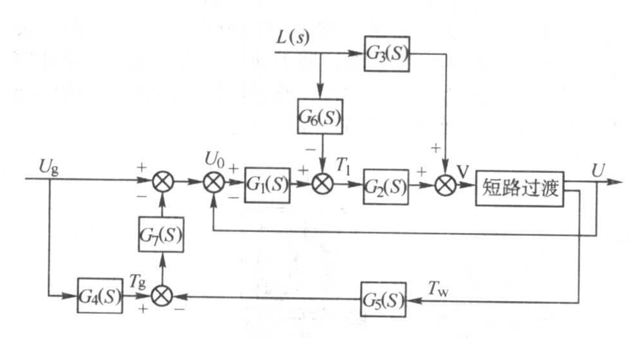


图5.3-74　CO_2短路过渡熔滴尺寸检测与控制系统

2）短路过渡周期统计平均负反馈控制　再燃弧电压与熔滴尺寸的对应关系往往受到环境、温度、气流、工件、焊接速度等因素的影响。而在等速送丝焊接时，无论负载状态或环境条件发生什么变化，焊丝送进量必须与熔化量保持平衡，也就是说，短路过渡周期的均值与熔滴平均尺寸间的对应关系不会受到上述因素的改变而改变。因而在焊接过程中，如果直接通过过渡周期的统计均值来调整燃弧脉冲电流时间T_1，就能保证熔滴平均尺寸不会受到上述干扰因素的影响。

图5.3-74所示的熔滴尺寸控制系统中，过渡周期均值负反馈是由$G_1(S)$、$G_2(S)$、短路过渡、$G_4(S)$、$G_5(S)$和$G_7(S)$等环节组成。

再燃弧电压反馈和过渡周期均值反馈具有互补性的特点：再燃弧电压反馈能够快速调整单个熔滴尺寸，但是容易受到输出回路及环境条件变化的影响；短路过渡周期均值反馈能够保证熔滴平均尺寸不会受到上述因素的影响，但是多个过渡周期的时间滞后将不利于单个熔滴尺寸的快速调整。如果结合二者的优点，通过过渡周期均值负反馈调整与熔滴尺寸对应的再燃弧电压期望值U_0，将不仅能够保留再燃弧电压控制快速性的优点，而且能够补偿环境条件变化对熔滴尺寸的影响，还可以降低对再燃弧电压期望值U_0的精确性要求，便于系统的实现。

3）焊丝干伸长变化前馈控制　根据焊丝熔化热分析结果，焊丝干伸长电阻热对熔滴尺寸的影响较大，因而在短路过渡焊接过程中，特别是在半自动焊接时，焊丝干伸长度的不断随机变化形成对熔滴尺寸的主要扰动。

对于存在扰动的系统，可以直接按照扰动规律进行补偿，称为前馈补偿。在设置前馈补偿的系统中，一旦出现扰动，前馈补偿环节就会直接根据扰动的大小和方向，按照一定的调节规律，补偿扰动对被控量的影响。由于惯性和纯滞后，扰动作用到系统上，被控量尚未发生变化，前馈补偿环节就进行了控制。如果控制作用恰到好处，可以使被控量不会因扰动作用而发生偏差。对于短路过渡焊接，如果在熔滴的形成过程中，根据焊丝干伸长度变化，适当调整燃弧能量大小，就可以补偿该变化对焊丝熔化量及熔滴尺寸的影响。

为此在图5.3-74所示的熔滴尺寸闭环控制系统中增加了$G_7(S)$来实现焊丝干伸长变化的前馈补偿。

（3）工艺实验

工艺实验结果表明，所建立的熔滴尺寸控制系统有效地提高了熔滴尺寸的可控性和一致性，见图5.3-75、图5.3-76。

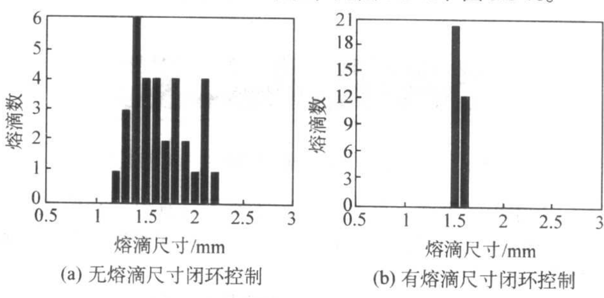


图5.3-75　连续32个熔滴的尺寸分布

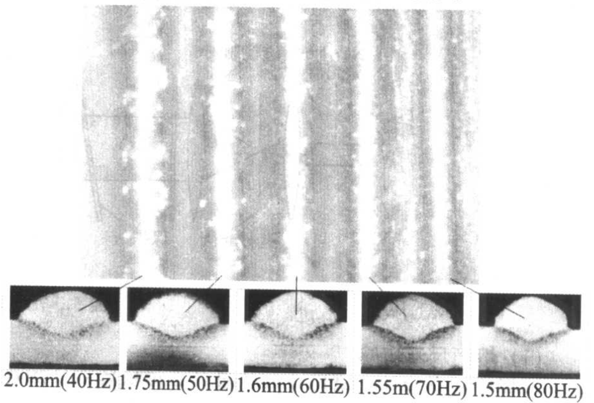


图5.3-76　不同熔滴目标尺寸的控制结果

2.2　焊接熔池几何形状检测与控制

受熟练焊工眼睛直接观察熔池进行控制的启示，尤其是近几年计算机视觉技术的日趋成熟及普通工业CCD摄像机的普及，直接采用熔池尺寸和形状作为传感信息和控制目标的研究工作方兴未艾，在很大程度上推动了焊接熔池控制的发展。许多焊接工作者根据不同的焊接方法，做了大量的尝试。

2.2.1　TIG焊接熔池形状检测与控制

TIG焊接过程电弧燃烧稳定，且无熔滴过渡过程，其熔池传感器的主要困难是如何避开电弧弧光的干扰。

山东大学建立了基于CCD摄像机的脉冲TIG焊接熔池几何参数计算机视觉信息检测系统，从试件正面采集到比较清晰的熔池区图像信号，从而检测出熔池的熔宽、熔池半长、熔池后部面积、熔池后拖角等几何参数。R. Kovacevic等开发了一个基于视觉传感与控制的TIG全熔透焊焊缝熔合状态闭环控制系统，该系统采用CCD摄像机从焊缝正面获取熔池图像，借助图像信号处理算法和模糊神经模型测量、预测正面及背面熔宽信息，从而控制焊缝熔合状态。英国的J. S. Smith和J. Lucas等采用计算机视觉传感技术在脉冲TIG焊的焊道面积跟踪、焊道轮廓检测、多道焊排道、窄间隙焊



等方面开展了大量的研究工作。1991 年开发成功的正面焊道面积控制系统，采用 CCD 摄像机在电弧基值电流的 3 ms 间隔期间获取焊道视觉图像，经计算机处理得出实际焊道面积与目标焊道面积达偏差信息，通过调节脉冲电流时间来控制正面焊道面积。

大多数视觉传感系统都通过 CCD 摄像机来获得熔池正面图像，然后提取熔池在二维平面上的宽度、长度等几何形状特征参数，在此基础上间接预测焊缝熔深、余高等。事实上，熔池本身是三维的，熔池表面高度信息也反映了焊缝成形好坏和接头质量的高低。文献 [64] 在脉冲 GTAW 基值期间，利用电弧光作为成像光源，采用两个 CCD 摄像机同时从熔池正面和背面获取熔池图像，获得了清晰稳定的熔池图像。在此基础上，开发了检测熔池宽度方向和长度方向下塌量的图像处理算法，可以实时提取出熔池的长度、宽度及熔池长度方向和宽度方向的下塌量等三维形状参数。特别是在熔池表面高度提取上，引入由阴影恢复形状的方法，考虑电弧光的光源特性、熔池表面的反射特性以及摄像机的位置参数等，建立了成像通用反射图模型。对反射图模型进行求解，可以由单幅焊接熔池图像计算出熔池的表面三维形貌（见图 5.3-77），从而为更高层次的焊缝质量控制奠定了基础。

2.2.2　CO_2 短路焊接熔池形状检测与控制

熔化极气体保护焊，尤其是 CO_2 短路过渡焊的熔池图像视觉检测的研究鲜见报道。原因在于其焊接过程中不仅存在较强的弧光干扰，还伴有飞溅及烟尘的产生，并且频繁的短路过渡过程会产生弧光闪烁，这些给熔池图像的传感带来了极大的困难。所以前述 TIG 焊的熔池图像传感技术难以直接应用。

CO_2 短路过渡焊接过程中存在交替进行的燃弧阶段和短路阶段。试验观察表明，短路阶段的一些特点有助于拍摄清楚一致的熔池图像。

1）短路阶段，焊接电弧熄灭，不存在电弧的闪烁现象和烟尘干扰。

2）熔池的表面温度已经下降到相对较低的程度，因此几乎不存在燃弧阶段焊接电弧和熔池之间的强烈反差，熔池图像灰度分布相对稳定。

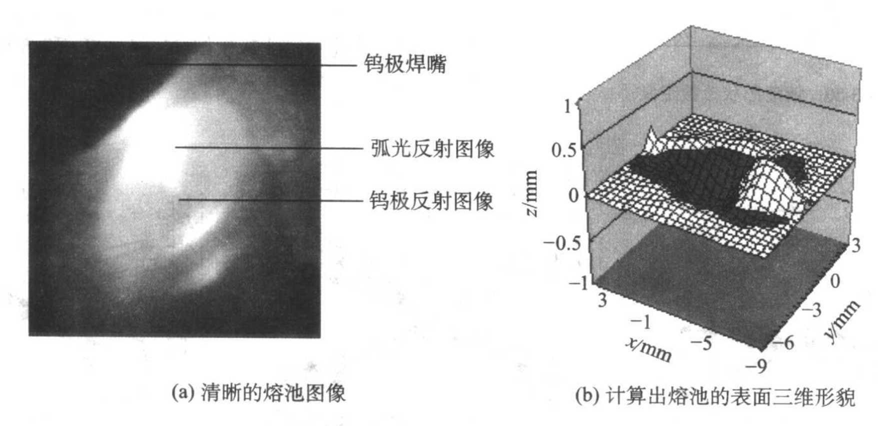
3）短路中期很少产生飞溅，可以很大程度地避免熔池图像中飞溅产生的噪声干扰。

4）没有再燃弧时电弧对熔池的冲击，熔池表面相对稳定。

综上所述，在短路阶段传感熔池图像的方案是可行的。但是，普通 ICCD 摄像机固定的拍摄时序和 CO_2 焊接中短路发生时刻的随机性之间的矛盾成为获取清晰稳定的熔池图像的主要障碍。特殊的 CCD 摄像机，可以通过外同步信号（检测从燃弧阶段到短路阶段的跃变）控制其拍摄时序来获得熔池图像，但这种摄相机目前仅局限于实验室使用，尚未实现商品化。并且，昂贵的造价和控制的复杂程度限制了其在工业中的应用。

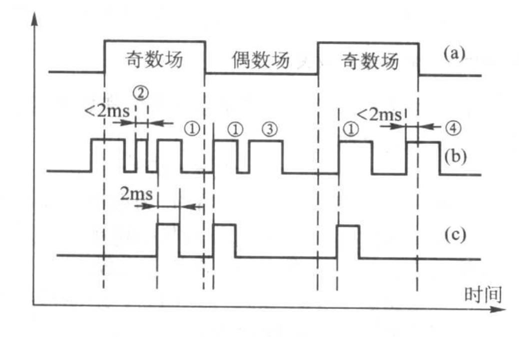
（1）短路过渡熔池图像传感原理

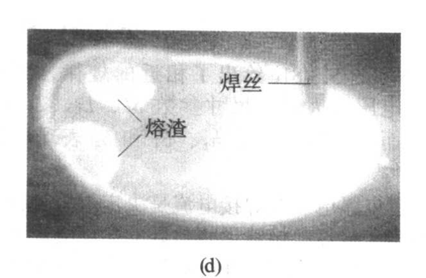
某文献认为在熔滴短路阶段弧光及飞溅的干扰较小，是获取熔池图像的最佳时期，为此研制了 CO_2 焊短路熔池视觉图像传感系统（见图 5.3-78），并设了专门的摄像机开始及结束时刻的同步逻辑控制电路。该电路在接收到短路信号后控制摄像机开始曝光，并保证图像信号序列的每场中只曝光一次，曝光时间为 2 ms（图中①），对于短路时间小于 2 ms 的非正常短路（图中②）、短路开始 2 ms 内出现跨场（图中④）以及同一场中出现的第二次短路（图中③）等现象自动加以屏蔽。



(a) 清晰的熔池图像　　(b) 计算出熔池的表面三维形貌

图 5.3-77　单幅焊接熔池图像计算出熔池的表面三维形貌





(d)

图 5.3-78　CO_2 熔池视觉传感系统同步逻辑及典型的熔池图像

（a）工业 CCD 曝光时序；（b）短路过渡时序；（c）同步逻辑时序；（d）典型的 CO_2 熔池图像



(2) 短路熔池图像检测系统

图5.3-79所示为短路熔池图像传感系统原理。ICCD摄像机固结在焊枪的一侧，同步逻辑电路可以检测并识别焊接短路信号。当拍摄条件满足时，同步逻辑电路产生一脉冲驱动ICCD摄像机抓取一幅熔池图像，图像数据经过图像卡转换后传送到计算机中做进一步的分析。

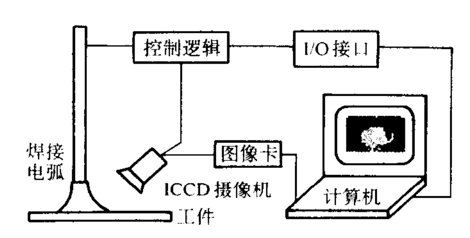


图5.3-79 短路熔池图像传感器系统原理

典型的熔池图像如图5.3-78 (d) 所示。从图像中可以清晰地分辨出焊接熔池边缘、浮在熔池表面的焊渣和熔池上方的焊丝、焊丝与熔池表面的交点 P 等。对熔池图像灰度分布进行分析和处理，可以获得熔池的形状参数。

(3) 熔池形状参数定义

传统的熔池长度和宽度等熔池尺寸参数不能充分地表征熔池特征，因此重新定义了可同时描述熔池尺寸和轮廓特征的新的形状参数，见图5.3-80。

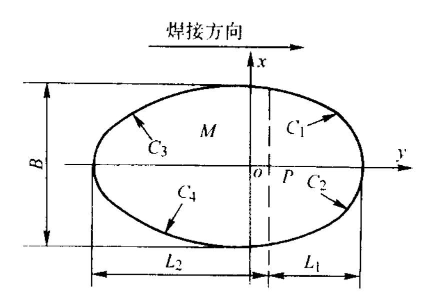


图5.3-80 熔池形状参数定义

首先，连接熔池边缘任意两点做直线，选择其在熔池内部截距最大的作为 y 轴；做 y 轴的垂线，同样选取在垂直于 y 轴方向的截距最大的作为 x 轴。由此，建立了熔池图像坐标系，其参数的定义如下。

M——熔池面积，通过累加熔池边缘线所包围的像素点而得；

P——焊丝和熔池表面的交点；

L_1——熔池头部长度，计算熔池前端点和 P 点之间的距离可得；

L_2——熔池尾部长度，计算熔池后端点和 P 点之间的距离可得；

B——熔池宽度，x 轴在熔池边缘线内部的长度；

C_i——熔池边缘线被坐标轴分为4部分，每段曲线可以通过式 (5.3-12)。

$$y = a_i + b_i x^2 : i = 1 \sim 4 \tag{5.3-12}$$

b_i——式 (5.3-12) 中二次项系数，用来描述熔池的轮廓参数

(4) 焊接工艺规范参数和熔池形状参数之间的关系

CO_2 焊接工艺规范参数中，焊接速度、电弧电压和焊接电流（与送丝速度有关）是影响熔池形状的主要因素。借助所开发得熔池图像传感系统，对这些规范参数和熔池形状参数之间的关系进行了实验研究和分析。

以电弧电压21 V、焊接速度13in/min（1 in = 2.54 cm）、焊接电流125 A工艺规范参数为基值，为此通过不同规范条件下的大量的焊接试验，获取并分析了不同规范下的熔池图像。通过图像处理和计算，可以得到上述定义的形状参数，包括熔池尺寸参数（面积 M、长度 $L_1 \sim L_2$、宽度 B 等）和轮廓参数（b_i，$i = 1 \sim 4$）。由此，可以得到焊接工艺规范参数和熔池形状参数之间的关系，如图5.3-81所示，图中横坐标代表焊接规范，纵坐标代表各个熔池形状参数的相应变化量。

由图5.3-81a可知，当焊接电弧电压和焊接电流保持恒定时，熔池的尺寸参数如 M、L_1、L_2 和 B 随着焊接速度的增加而增大，而轮廓参数 b_3、b_4 显著减小，b_1、b_2 变化缓慢。

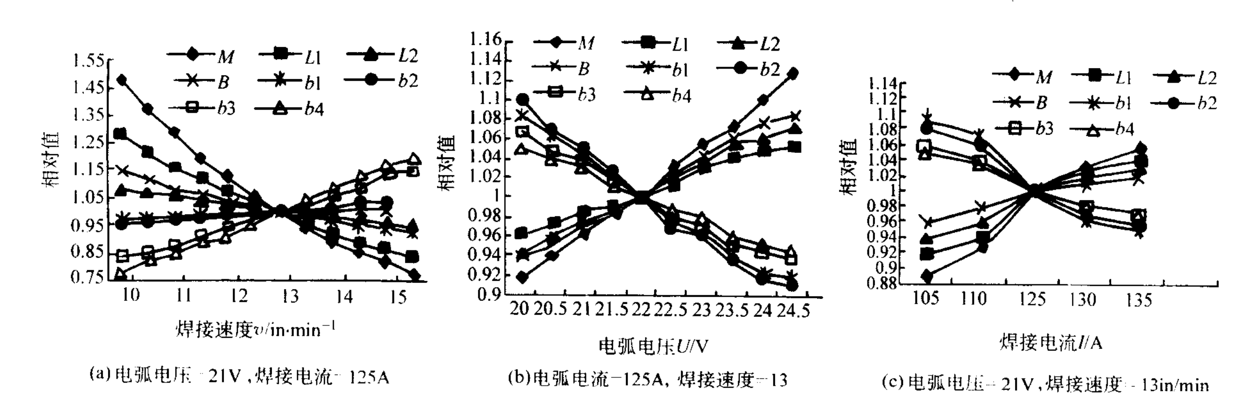


图5.3-81 焊接规范参数与熔池形状参数对应关系

图5.3-81b和图5.3-81c给出了相近的规律，即：当焊接电流或电弧电压增大时，尺寸参数 M、L_1、L_2 和 B 随之同步增长，而轮廓参数 b_1、b_2、b_3 和 b_4 表现出相反的趋势。

焊接速度、电弧电压及焊接电流是决定焊接过程中能量输入的主要因素，显然，熔池形状参数的变化决定于焊接热输入的变化。获取它们之间内在的数理关系需要更深层次的研究与探索。

焊接规范参数和熔池形状参数之间的非线性关系，导致难以精确地建立它们之间的数学模型。为此，本文采用幂函数来简化这一模型。熔池形状参数和焊接工艺规范参数之间的关系如下所述：

$$P_i = CU^{\alpha} I^{\beta} v^{\gamma} \tag{5.3-13}$$

式中，P_i 为任一形状参数；C 为取决于工件材料、板厚等因素的常数；U, I, V 为分别代表电弧电压、焊接电流和焊接速度；α, β, γ 为试验确定的幂指数。

根据图5.3-80和式 (5.3-13)，熔池形状参数和焊接工艺规范之间关系的具体描述如下：

$$M = C_M U^{1.05} I^{0.68} v^{-1.48} \tag{5.3-14}$$



$$L_1 = C_{L_1} U^{0.32} I^{0.43} v^{-1.0} \tag{5.3-15}$$

$$L_2 = C_{L_2} U^{0.54} I^{0.35} v^{-0.33} \tag{5.3-16}$$

$$B = C_B U^{0.67} I^{0.27} v^{-0.49} \tag{5.3-17}$$

$$b_1 = C_{b_1} U^{-0.91} I^{-0.48} v^{0.23} \tag{5.3-18}$$

$$b_2 = C_{b_2} U^{-0.97} I^{-0.51} v^{0.27} \tag{5.3-19}$$

$$b_3 = C_{b_3} U^{-0.70} I^{-0.32} v^{1.08} \tag{5.3-20}$$

$$b_4 = C_{b_4} U^{-0.62} I^{-0.3} V^{0.99} \tag{5.3-21}$$

实验初步建立的上述熔池形状参数和焊接工艺规范参数之间的关系，为 CO_2 短路焊接质量控制奠定了基础。

（5）CO_2 短路过渡焊接熔池图像传感器的改进

目前使用的视觉传感系统一般采用将 CCD 摄像机通过支架直接固定到焊枪上的结构形式（见图 5.3-82）。为避免图像被焊枪喷嘴遮挡，必须保证足够的支架长度 W_d，使得由摄像机、支架和焊枪组成的三角机构占据较大的空间，由此造成的焊枪空间可达性上的不足制约了此类系统的工程应用。

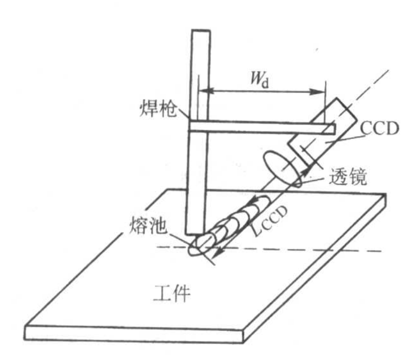


图 5.3-82　常见的基于 CCD 摄像机的视觉传感系统示意图

采用光纤传感的方式，可以减小传感器的体积，但其造价过高。为了在保持低成本的同时，达到减小体积、改善焊枪可达性的目的，采用了一种以半五角棱镜为核心的特殊光路偏转结构（见图 5.3-83）。CCD 摄像机就近平行于焊枪放置，在其下方放置一块半五角棱镜。基于镜面成像及全反射现象，以二维信息为主的熔池图像经 45°偏折后，通过透镜在 CCD 靶面上成像。选用焦距适当的双胶合透镜，经过光学计算合理放置滤光片、半五角棱镜、透镜和 CCD 摄像机的相对位置，配以合适的光圈与 CCD 时序控制，即可获得失真很小的清晰的熔池图像。

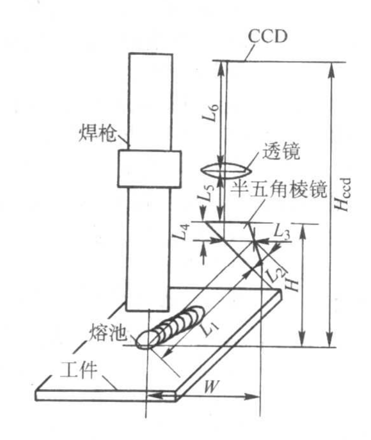


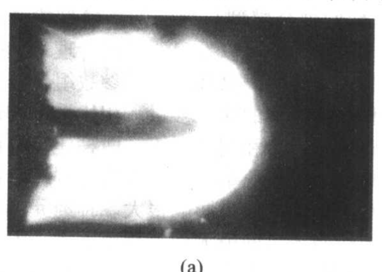
图 5.3-83　基于特殊光路的熔池图像传感器结构

采用改进的 CO_2 短路过渡焊接熔池图像传感器，配以图像采集卡、工业计算机及 Visual Basic6.0 编制的熔池图像采集程序，在工件板厚为 5 mm 的 A3 钢板上进行平板堆焊实验（焊接规范参数为：焊接电流 140 A，焊接电压 20 V，焊接速度 10 in/min，1 in = 2.54 cm），对传感器的图像分辨率、采集正确率和采集速度进行了测试，结果为：图像传感器在 x 轴的分辨率为 0.0303 mm/pixel，y 轴的分辨率为 0.0208 mm/pixel；采集正确率大于 90%。少数图像存在少量的飞溅干扰，主要原因是在采集图像的结束时刻，短路液桥发生了爆断；正常焊接时的平均采集速度约为 17 帧/s。采集速度主要受到焊接工艺的影响，在焊接工艺参数合理，短路过渡过程平稳且稳定的情况下，短路频率越高采集速度越高。

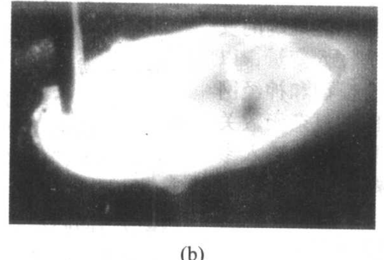
（6）图像传感器的检测效果与应用分析

焊枪与传感器平行固定放置保证了熔池在 CCD 靶面上成像位置的相对不变，而将传感器绕焊枪轴线旋转可以从不同的角度检测焊接区域的熔池图像，以满足不同的检测与控制要求。

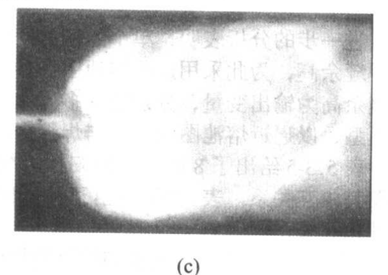
图 5.3-84 所示为从不同角度检测到的 5 mm 厚 A3 钢板堆焊实验中的典型熔池图像。



(a)



(b)



(c)

图 5.3-84　不同角度检测到的熔池图像

图 5.3-84a 的观察角度与焊接方向夹角为 0°的检测结果，可以非常清晰地观察到熔池头部形状，据此可以对熔池的头部形状进行控制。此外，在附加照明装置的情况下，可以进一步检测到熔池前方的焊缝，用于焊缝实时跟踪和路径规划。

图 5.3-84b 观察角度与焊接方向成 75°夹角，焊枪及焊丝的影响较小，可以检测到完整的熔池形貌，有利于对熔池各形状参数的提取。在此基础上，建立熔池形状参数、焊接工艺参数及焊缝成形参数的关系数据库，可以从视觉角度进行焊接质量控制。

图 5.3-84c 观察角度与焊接方向成 180°夹角，即从熔池尾部观察，焊枪和焊丝影响最小，对于熔池形状参数的提取提供了便利。从这一角度进行检测，可以比较直观的获得熔宽、熔池中心、后拖角等熔池形状参数。但要考虑熔池由于焊缝金属的堆积而向前倾斜，熔池图像在长度方向上的压缩现象。

（7）熔池图像参数与焊缝余高的多元回归拟合模型和神经网络模型

熔池图像包含了反映焊接过程的丰富的信息，通过研究熔池图像参数与焊接过程的关系，可以准确地反映焊接过程



的变化，而且可以根据熔池图像的变化对焊接过程进行控制。从熔池图像中反映焊缝的成形情况，其中熔宽的反映比较直观，但是无法直观的反映余高的变化，原因是熔池图像主要为二维平面信息，对于第三维的余高，图像获取的信息量不足。可以通过熔池图像参数间接的反映出焊缝余高的信息。为了准确的反映熔池图像与焊缝余高的关系，熔池图像参数的定义必须能够全面地反映熔池的特征。熔池图像参数的定义如图 5.3-85 所示。C 为焊丝与熔池表面交点，O 为熔池中心线 A_1A_2 与熔宽线 B_1B_2 的交点，A_1 为熔池头部顶点，A_2 为熔池尾部顶点。设定：熔宽 B_d，熔池头部长度 L_h，熔池尾部长度 L_t，C 点到 B_1B_2 的距离 L_{cb}，过 C 点位置熔池宽度 L_c，熔池尾部顶点对熔宽线的张角 A_t，即角 $B_1A_2B_2$，熔池面积 W_a。熔池边缘线的弯曲程度对熔池形状有很大影响，因此把熔池边缘以熔宽线 B_1B_2 为界分为前后两部分。以 A_1A_2 方向为 x 轴，B_1B_2 方向为 y 轴，o 为原点，建立坐标系（K_1），采用形如 $x = Py_2 + P_0$ 的二次曲线对熔池边缘点进行拟合，其中二次项系数 $|P|$ 的大小决定了曲线开口的大小，$|P|$ 越大，曲线的开口越小，熔池边缘线的弯曲程度越大，反之，$|P|$ 越小，曲线的开口越大，熔池边缘线的弯曲程度越小。P_h 表示熔池前部边缘线 $B_1A_1B_2$ 部分的二次曲线拟合的二次项系数，与 P_h 对应的 P_0 相当于 $L_a + L_{cb}$；P_t 表示熔池后部边缘线 $B_1A_2B_2$ 部分的二次曲线拟合的二次项系数，与 P_t 对应的 P_0 为 $L_t - L_{cb}$。至此，完成了熔池图像参数定义，所有的参数为 B_d，L_h，L_t，L_{cb}，L_c，A_t，W_a，P_h，P_t。这 9 个熔池图像参数比较全面的表达了熔池的特征。

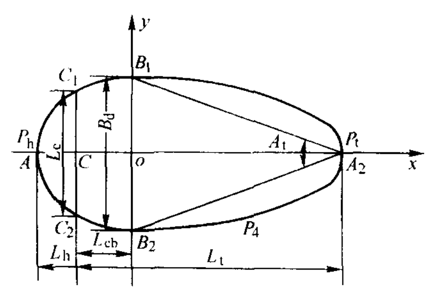


图 5.3-85　熔池图像参数定义

进一步的分析表明，单个的熔池图像参数不能准确的反映焊缝余高，为此采用这些熔池图像参数作为输入变量，以焊缝余高为输出变量，分别建立多元回归拟合模型和神经网络模型，以逼近熔池图像参数与焊缝余高之间的复杂函数关系。表 5.3-5 给出了 8 组多元回归拟合模型所选择的输入参量及其相互关系。表 5.3-6 给出了神经网络模型的输入参量及其相互关系。

表 5.3-5　不同多元回归模型选择的输入参量及参量之间关系

模型	所选择输入参量	参量之间关系
1	B_d，W_a，L_{cb}，A_t	独立参量影响，交互作用，物理意义不明显
2	B_d，W_a，L_{cb}，A_t	独立参量影响，交互作用，具有一定物理意义
3	B_d，L_c，L_{cb}，P_t，A_t	独立参量影响
4	B_d，W_a，L_{cb}，A_t，P_t	独立参量影响，交互作用，具有一定物理意义
5	B_d，W_a，L_{cb}，P_t	独立参量影响，交互作用，具有一定物理意义
6	B_d，L_c，L_{cb}，P_t	独立参量影响
7	B_d，L_c，L_{cb}，P_t	交互作用，具有明确物理意义
8	B_d，L_c，L_{cb}，P_t	独立参量影响，交互作用，具有明确物理意义

表 5.3-6　不同神经网络模型选择的输入参量

模型	所选输入参量
1	B_d，W_a，L_{cb}，A_t，$(B_d)^2$，$(W_a)^2$
2	B_d，W_a，L_{cb}，A_t，B_dL_{cb}，B_dA_t
3	B_d，L_c，L_{cb}，P_t，A_t
4	B_d，W_a，L_{cb}，A_t，P_t，B_dL_{cb}，B_dA_t，B_dP_t
5	B_d，W_a，L_{cb}，P_t，B_dL_{cb}，B_dP_t
6	B_d，L_c，L_{cb}，P_t
7	B_dL_c，B_dL_{cb}，$(B_d)^4P_t$，$(B_d)^2$
8	B_d，L_c，L_{cb}，P_t，B_dL_c，B_dL_{cb}，$(B_d)^4P_t$，$(B_d)^2$

表 5.3-7　回归拟合模型与神经网络模型检验误差比较

回归模型	回归模型检验误差		网络模型检验误差		网络模型
	最大误差/%	均方误差/%	最大误差/%	均方误差/%	
1	13.553	8.234 9	12.043	4.282 8	1
2	13.11	8.212 6	11.952	4.784 3	2
3	12.663	8.197 3	11.843	4.691	3
4	11.695	8.209 4	10.552	4.789 6	4
5	10.704	8.263 1	9.654	4.686 2	5
6	10.06	8.182 3	9.59	4.641	6
7	11.11	8.256 8	10.04	4.843 5	7
8	9.224 5	8.298 1	8.653 5	4.473 9	8

表 5.3-7 分别采用回归拟合模型与神经网络模型检测焊缝余高的检验误差对比。从表中可以看出，通过合理的选择熔池图像参数，选择具有相对明确物理意义的参数组合作为回归拟合模型的参量和网络模型的输入参量，相比采用物理意义不明确的参数组合进行拟合和网络训练，两种建模方法都能够得到较好的检验结果。说明熔池图像参数与焊缝余高之间存在的内在规律对于模型的效果影响很大。神经元网络模型与回归拟合模型的检验结果的最大误差相差不大，但是均方误差网络模型约为回归拟合模型的一半。说明神经元网络对于高度非线性的函数关系的逼近要好于回归拟合模型，也说明了在从熔池图像参数检测焊缝余高这一特定研究内容范围内，神经网络模型具有更好的适用性。

2.2.3　基于温度场的熔池形状检测与控制

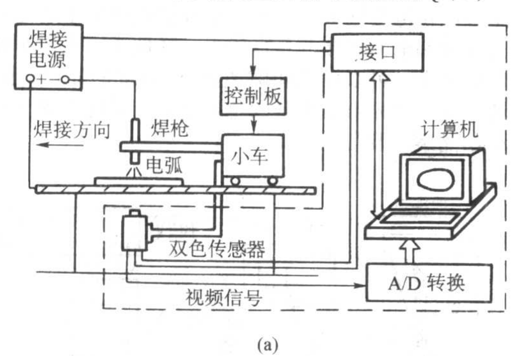
因为焊接是一个复杂的物理过程，无法进行实时、准确地模拟，直接测量焊缝熔深比预测更有意义。而焊缝区域的温度场内包含着焊接接头质量及性能的重要信息，焊接温度场及其动态过程的检测是焊接领域的前沿课题之一。

1998 年 Ohio 州立大学的 D. Farson 等建立了一种基于光学测温的正面、非接触温度测量系统，采用 CCD 摄像机对 GTAW 焊熔池附近的母材温度进行红外测量，通过建立相应的温度模型，实现熔深实时检测与控制。

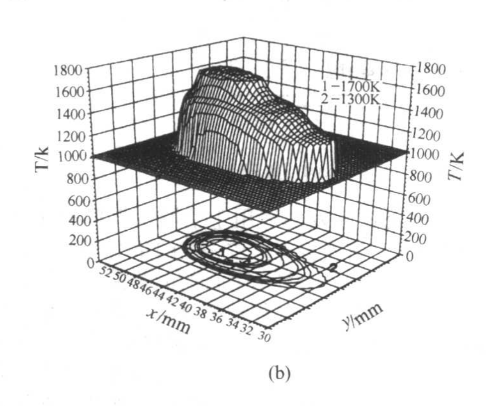


美国 Auburn 大学的 B.A.Chin 和 W.H.Chen 等近年来采用红外摄像机在弧焊过程的红外温度场（infrared thermography）检测方面开展了大量研究工作。1983 年，他们首先提出电弧不对中、接头几何缺陷、熔深变化和杂质等会分别地引起熔池表面温度的不同分布。在焊接过程中，采用温度分辨率为 ±0.2℃的扫描式红外摄像机监测熔池，通过计算机对图像进行分析处理，可以获得电弧运动或静止时的熔池表面温度等温线。该摄像机能够监控电弧相对于焊缝的位置，识别母材的几何缺陷（如间隙、错位等）。运动电弧前端的表面等温线的不同类型的变化直接与熔深、夹渣、障碍物等有关，在凝固前熔池中的直径为 0.8mm 的缺陷也可以被检测出来。在此基础上，1989 年他们采用红外温度场图传感电弧位置和熔深，并通过计算机图像处理技术将其量化，从而实现机器人焊接熔池位置和熔深的闭环控制。1990 年，用其检测接头熔深和熔宽与温度梯度变化的关系，发现熔宽与半峰值温度线轮廓宽度成线性关系，而熔深与峰值轮廓温度线面积成指数关系。随后在 1995 年建立了用于 GTAW 焊的在线焊缝形貌检测与控制系统。

温度为 T 的辐射源，通过中心波长 λ、带宽为 $\Delta\lambda$ 的滤光镜，在距离 R 处的 CCD 光敏面上的信号强度为 $Q(T)=m\varepsilon C_1\exp(C_2\lambda^{-1}T^{-1})R^{-2}$。式中 ε 为辐射率；m 为光电转换系数；C_1、C_2 是物理参数。对同一温度场，采用两个不同中心波长的滤光片，同时摄取两幅图像，则具体一个物理空间点的图像灰度（对应于辐射）在两幅图像的相同位置上分别为 $Q_1(T)$和 $Q_2(T)$，其辐射信号之比值为：$r=\dfrac{Q_1(T)}{Q_2(T)}=\dfrac{\lambda_2^5}{\lambda_1^5}\exp\left[C_2\left(\dfrac{1}{\lambda_1 T}-\dfrac{1}{\lambda_2 T}\right)\right]$，整理后得 $T=\dfrac{C_2(\lambda_1^{-1}-\lambda_2^{-1})}{\ln(r\lambda_1^5\lambda_2^{-5})}$，逐点求两幅图像的灰度比值，可以获得各点的真实温度。这一测温原理又被称为比色法。基于此原理，某文献建立了一套焊缝背面温度场实时检测系统，见图 5.3-86a。基于比色法测温原理，该系统采用两个不同中心波长的滤光片，对同一温度场同时摄取两幅图像，逐点求两幅图像的灰度比值，从而获得各点的真实温度。图 5.3-86b 给出了一个实际的温度场方便检测结果、从这些温度场分布中可以获得等温线分布、纵向温度分布、横向温度分布、任意点的热循环信息，从而为焊接质量控制提供必要的反馈信息。该文对背面熔点或接近熔点的等温线宽度进行闭环控制，实现了控制熔透的目的。



(a)



(b)

图 5.3-86 焊缝背面温度场实时检测系统及检测结果

2.3 焊接过程热输入控制

焊接过程中为形成熔池并保持熔池的稳定性，需要电弧提供足够的瞬时功率和热输入。这一瞬时功率值应该保持在一个范围，过低则无法形成连续焊道，过高则会造成驼峰、咬边等缺陷。传统的单丝电弧焊很难通过加大电流的方式来提高焊速，要实现稳定的高质量的高速高效化焊接，必须在增加对母材和焊丝的总能量输入的同时，合理配置用于形成熔池和熔化焊丝的瞬时功率，即应该在保持足够的对熔池的瞬时输入功率的前提下，尽可能多的增加用于熔化焊丝的瞬时功率，以提高熔敷效率。

下面分别介绍国内外在多丝多弧焊接工艺、多元气体保护焊接工艺、活性化焊接新工艺等方面的研究进展。

2.3.1 多丝多弧焊接新工艺

传统的弧焊工艺（如 TIG 焊、CO_2 焊）一般采用单电源供电或单焊丝的方式，近年来日本、瑞士、德国等公司在多根焊丝配以单个或多个电源方面进行焊接开展了大量的研究工作，在提高焊接生产速度和金属熔敷率方面取得了一些实用化的成果。

日本的藤村告史开发的多丝焊接系统（见图 5.3-87）采用电流相位控制的脉冲焊接焊丝，电弧在三条焊丝上轮流燃烧，在保证电弧挺度的同时，通过调节各焊丝之间的位置关系及其焊接方向的夹角，来改变能量分布，使焊接过程稳定，从而减少咬边及驼峰等成形缺陷。该方法可用于角焊缝的高速焊接，焊速可以达到 1.8 m/min。

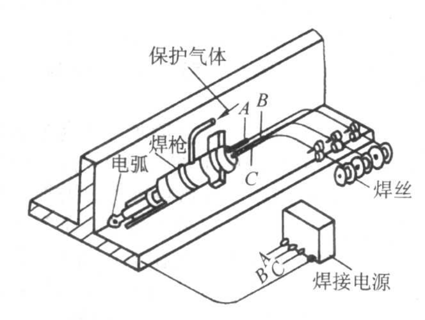


图 5.3-87 三丝焊接系统示意

为了避免一个电弧时热量过于集中，电流太大时发生烧穿，日本 IHH 发明了双弧 TIG 焊法，其原理如图 5.3-88 所示。两个电极是四方形的，中间用绝缘材料绝缘，另外外加

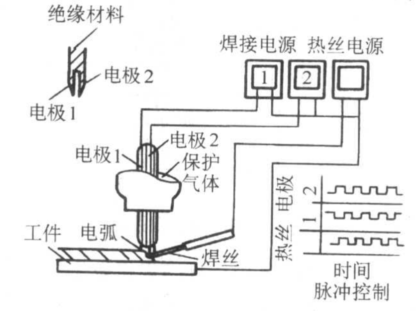


图 5.3-88 高效双弧 TIG 焊



热丝补充；三者都采用脉冲电流，两个电极的脉冲和基值电流时间由同步器协调至正好互补，但电流值不同。在横焊时两个电极一上一下，上电极电流小，下电极电流大，可以进行窄间隙焊接。

日本在54届IIW年会上发表的双丝MAG焊工艺，其原理是用熔池过热多余的热量来熔化填充焊丝，增加熔敷率，同时用大电流提高焊接速度。在焊接电流大，焊接速度快的施焊条件下，由于填充丝吸收了热量，母材热影响区热输入大为减少，减少了性能恶化和变形，也改善了焊缝成形。如图5.3-89所示，前面的焊丝产生电弧，后面的填充丝直接插入熔池，流入熔池的电流有一小部分倒过来通过填充丝流入地线。由于两根焊丝的电流相反，熔滴在反向电流产生的磁场排斥作用下向前倾斜，而使填充丝能顺利送入熔池，填充丝下部导管用陶瓷保温，增加熔化率。

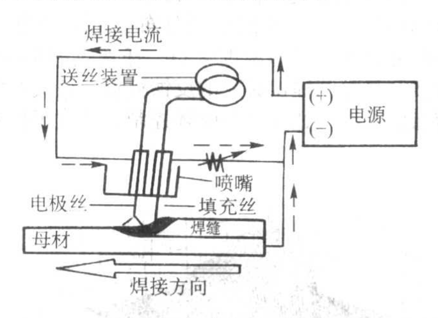


图5.3-89 双丝MAG焊

德国CLOOS公司开发的适用于中厚板焊接的TANDEM高速双丝焊丝设备，将两根焊丝按一定的角度放在一个特别设计的焊枪里，两根焊丝分别由各自的电源供电，除送丝速度可以不同外，其他参数（如焊丝的材质、直径、是否加脉冲等）都可以彼此独立设定，从而保证电弧工作在最佳状态。与其他双丝焊技术相比，不仅可以提高熔敷速度，大大提高焊接效率，而且由于两根焊丝处于同一熔池，降低了气孔敏感性，改善了焊缝质量。正常条件下，TANDEM双丝焊工艺的焊接速度可达2～6 m/min，熔敷率约20 kg/h，配用电源60%负载持续率，电流2×550 A，最高脉冲电流可达1 500 A。

1998年，美国Kentucky大学发明了一种能显著增加熔深且成本低廉的双面双弧焊接工艺（DSAW），见图5.3-90。DSAW焊接方法有效地提高了电弧穿透力，增加了熔深；减小了热影响区的尺寸；降低了试件厚度方向的温度梯度，从而有利于减小热变形。其不足之处在于：该工艺需要同时在工件的正反面进行焊接，在实际应用中有很大的局限性；由于其背面不能加垫板等，因而无法应用于薄板焊接，而只能用于中等厚度板的直接对接焊接。

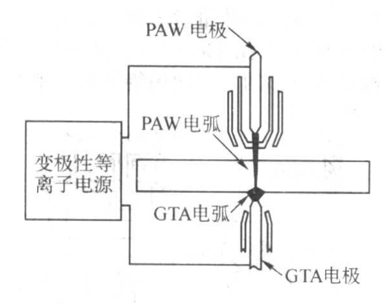


图5.3-90 双面双弧焊

激光的高能量密度可用来提高焊接效率，但焊接工艺中遇到的问题主要是由于光束直径很细，要求坡口装配间隙小于0.5 mm，跟踪精度要求高，同时在尚未形成熔池时热效率很低。这些问题可以通过激光－MIG复合焊解决（见图5.3-91）。由于MIG焊的复合，熔池宽度增加使得装配要求降低，焊缝跟踪容易，由MIG电弧可以解决初始熔化问题，从而可以减少使用的激光器的功率。同时MIG焊的气流也可以解决激光焊金属蒸气的屏蔽问题，MIG焊便于加入填充焊丝，从而可以避免表面凹陷形成的咬边。而激光焊的深熔、快速、高效、低热输入特点仍保持。

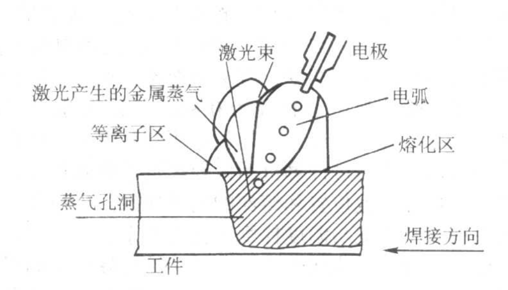


图5.3-91 激光－MIG复合焊

三菱重工开发了一种可快速实现坡口焊接和铝合金焊接的复合YAG激光焊接系统（见图5.3-92）。该系统将激光光束和电弧电极同轴合成在一个焊接电极头中，充分发挥了激光焊接和电弧焊接的各自优点，降低了激光焊对坡口定位精度的要求，可以焊接间隙达到0.8 mm的坡口；同时由于电弧减缓了激光照射部分的急剧冷却，可防止焊接铝合金时产生结晶裂纹及气孔等。

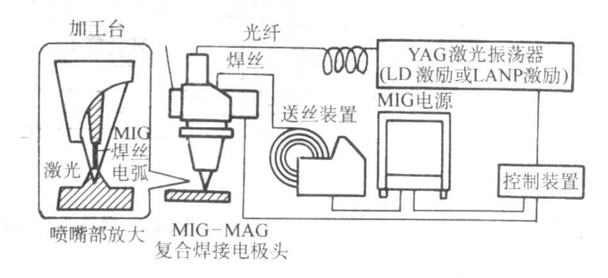


图5.3-92 MIG/MAG复合焊接系统

奥地利Fronius公司开发的最新的高速GMA焊接系统（见图5.3-93），采用两套电源两套送丝系统，送丝速度、焊接电流、焊接电压及两条焊丝燃弧与短路的相对时序关系（见图5.3-94）均可以分别控制。采用该系统，用1.2 mm焊丝焊接2.3 mm厚铝板时的焊接速度可以达到2 m/min。

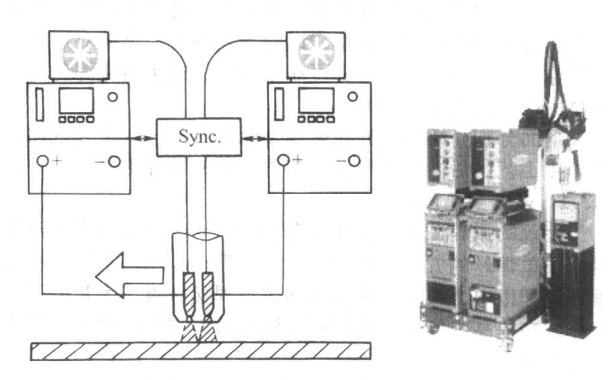


图5.3-93 高速GMA焊接系统

传统的单丝电弧焊焊丝提不高的原因是电弧热量过于集中，在采用大电流高速焊时焊缝中部隆起，两侧咬边，焊缝内形成隧道状空孔。热输入明显减少，适合于焊接对线能量要求严格的低合金高强钢。

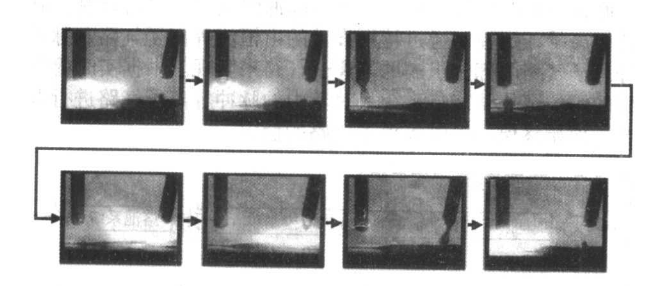


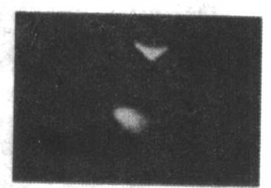
图 5.3-94　双丝双弧高速 GMA 焊接熔滴过渡过程

2.3.2　活性化 TIG 焊接技术

普通 TIG 电弧进行不锈钢、钛合金、铝合金等材料焊接时，由于电弧热量分散及电弧力数值低等原因，通常单层焊接只能获得较小的熔深。对于厚度较大的板材或管材焊接，需背面完全熔透时，就要进行坡口加工并采用多层焊接。多年来国外一些机构（如英国 TWI、美国 EWI、乌克兰 PATON）就如何提高 TIG 焊效率问题进行了研究，并逐步提出了“活性化 TIG 焊（A－TIG 焊）”的概念。近来国内有关单位在此领域也开展了一些研究工作。如哈尔滨工业大学在对 A－TIG 焊中的“电弧收缩”现象（见图 5.3-95）和“熔池表面张力变化”现象（见图 5.3-96）的内在机理进行了详细分析的基础上，把某种物质成分的活性剂涂敷在被焊件母材焊接区，正常规范下焊接熔深大幅度提高，比如不锈钢材料的焊接，其单层熔深可以增加 1 倍以上，6 mm厚度试板不开坡口可以一次焊透（见图 5.3-97）。



(a) 无活性剂



(b) 有活性剂

图 5.3-95　活性剂引起的“电弧收缩”现象

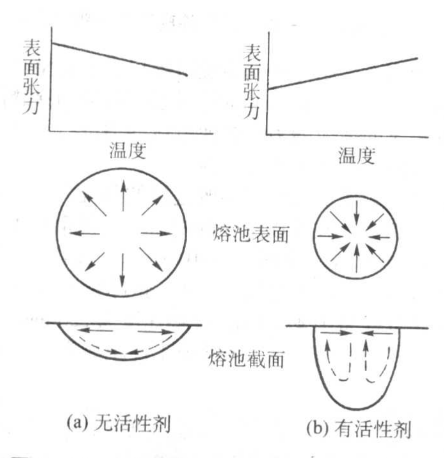
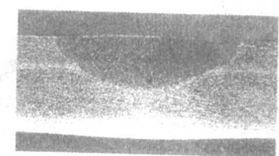
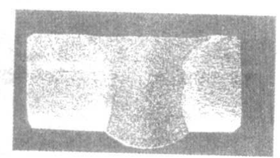


图 5.3-96　活性剂引起的“熔池表面张力变化”



(a) 无活性剂



(b) 有活性剂

图 5.3-97　TIG 焊与 A－TIG 焊的熔深对比

2.3.3　改变保护气体成分提高焊接速度

瑞典的 AGA 公司通过改变保护气体成分来提高焊接速度，采用高速送丝和低氧化性气体 MISON8（该公司专利产品），焊速可达 1～2 m/min。

奥地利的 Fronius 公司代理的专利技术 T.I.M.E 焊接工艺，增加熔化焊丝的电阻热，采用 O_2、CO_2、He、Ar 四元保护气体，在连续大电流区间获得了稳定的旋转射流过渡形式，使其焊丝熔敷率较传统 MAG 焊工艺提高 2～3 倍，达到 430 g/min。

上面所述的多丝多弧焊接工艺，实质是改变了焊接过程中的瞬时功率分配。多元气体提高焊接速度的工艺，也是在保证良好的焊缝保护的前提下，增加焊丝熔焊率来实现的。活性化焊接技术是通过改变表面张力分布来影响熔池金属的流动方式、改变电弧气氛来影响电弧形态，从而以增加焊缝熔深、改善焊缝成形的途径来提高焊接效率。

2.4　熔深检测与控制

熔透控制是焊接质量控制技术的重要方向之一，其技术关键在于如何有效地获得反映焊接熔透（声）的信号。目前已有的技术包括温度场检测、超声波检测、图像法检测、电信号检测和熔池振荡检测等。

2.4.1　MIG 焊接熔深检测与控制

（1）基于正面熔池宽度检测的焊缝熔深控制

通过周期性的减少 MIG 焊的焊接电流，在小电流期间摄取熔池图像，排除了弧光干扰，获得了清晰的熔池图像，如图 5.3-98 所示。从图像中可以直接提取熔池宽度，实时的调节焊接电流，从而控制焊接熔深，如图 5.3-99 所示。

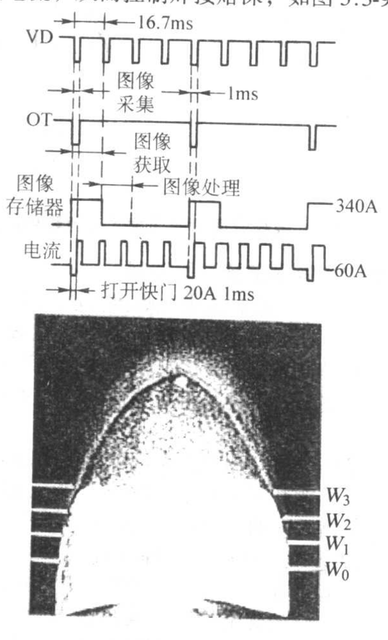
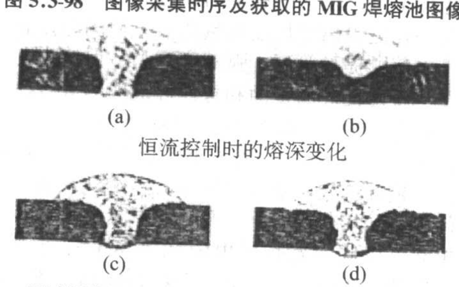


图 5.3-98　图像采集时序及获取的 MIG 焊熔池图像



恒流控制时的熔深变化

通过视觉检测熔宽调节电流控制后的熔深变化

图 5.3-99　基于正面熔池宽度检测的焊缝熔深控制效果

(2) 基于熔池背面热辐射（温度场）分布检测的熔深控制

基于熔池背面热辐射分布检测的熔深控制系统如图5.3-100所示，光纤的使用是为了能够从管道或容器类焊接结构中取得焊缝背面的辐射信号，滤色镜可以避免环境的光线干扰，通过辐射信号提取焊缝背面温度场从而改变焊接规范的工作则由计算机来完成。焊缝背面的实际横向温度分布：$T(Y)=K_t\exp(-\xi Y^2)$，如图5.3-101a所示，CCD获得的焊缝背面辐射能分布如图5.3-101b所示。通过理论推导和数值计算，可以从焊缝背面辐射能分布推导计算出实际的横向温度分布。这种温度场检测方法的优点是不受传感器到目标距离的影响：由电弧中心即信号峰值起，计算出超过材料熔点温度的宽度，就了解到焊缝背面当前的熔透程度，于是可以对包括电源在内的焊接设备进行必要的控制，使焊缝几何尺寸达到预定的目标。

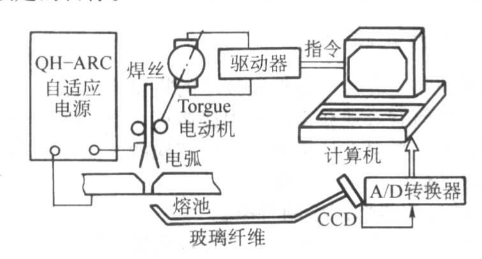


图5.3-100　基于熔池背面热辐射分布检测的熔深控制

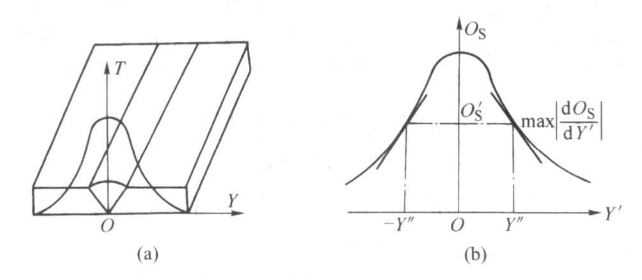


图5.3-101　焊缝背面横向温度分布与辐射能分布

2.4.2　等离子焊接熔深检测与控制

等离子弧焊与其他高能束流焊接方法相比，具有设备简单、实现容易和成本低廉的优势。而“小孔效应”的存在，使脉冲等离子焊接具有诸多优点，因此小孔型等离子焊接在工业尤其是航空航天制造及重要结构和零件生产中得到了广泛的应用。

为提高等离子弧穿透力，实现稳定的、高质量的小孔型焊接，国内外学者开展了大量的研究工作。通过对新型喷嘴的研究、磁压缩工艺的研究以及气动压缩工艺的研究来提高等离子弧焊穿透力。通过研究焊接规范参数（如电流、电压、等离子气流量等）与焊接质量的关系，从而优化焊接规范参数来获得良好的焊缝成形。通过测量和分析电弧电压、声音、等离子电荷发射、弧光辐射密度、小孔图像等信息，以期实现小孔型等离子焊接质量的实时检测与控制。但上述方法都难以兼顾提高等离子弧的穿透力、保持小孔焊接过程的稳定性、获得良好的正面和背面焊缝成形等方面，难以对厚度6 mm以上的钢板实现稳定的小孔型焊接。

如图5.3-102所示，等离子小孔焊接闭环控制系统主要包括由执行控制单元、信号采集单元、熔池系统、计算机组成的硬件部分和实现“一脉一孔”控制策略的软件部分。执行控制单元可以同时对焊接电流和等离子气流进行脉冲调节。焊接电源采用高频引弧后，直接切换到等离子弧的工作方式，通过信号采集单元实时采集电弧电压，并采用小波方法从焊接电弧电压信号中实时、准确的提取熔池穿孔信息，控制弧焊电源的输出可以实现对脉冲焊接电流进行调制。脉冲等离子气流控制通过特别设计的由恒流等离子气路和脉冲等离子气路两部分组成的等离子气路来实现。根据实时检测到的熔池穿孔状态，系统只对其中的脉冲等离子气路进行调节，而始终保持恒流等离子气路的稳定。

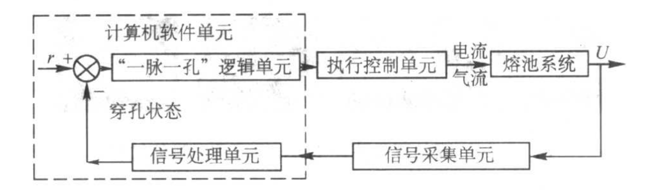
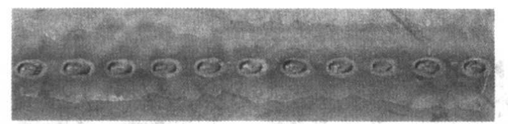
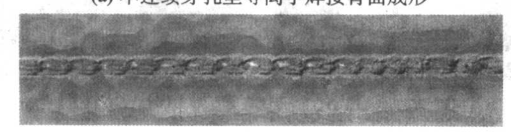


图5.3-102　等离子小孔焊接熔透闭环控制系统

实验表明在长时间的穿孔焊接过程中，由于各种因素的干扰，小孔熔池很难稳定的存在，要么随着熔池的加大出现下塌甚至切割，要么由于穿透力不足不能穿透熔池形成小孔。为此，设计了“一脉一孔”的控制策略来实现厚板的稳定的小孔型焊接。该方法将原来连续长时间的穿孔过程分割为一个个稳定连续的小孔。其控制原理为：在小孔出现前使用较大的脉冲规范，使熔池迅速形成小孔，然后调整规范到脉冲谷值使熔池凝固冷却，随后在小孔缩小消失之际再迅速使规范上升至脉冲峰值，开始新的循环过程。由此得到尽可能细小而紧密相连的小孔，连成均匀高质的焊缝，如图5.3-103所示。



(a) 不连续穿孔型等离子焊接背面成形



(b) 连续穿孔型等离子焊接背面成形

图5.3-103　“一脉一孔”等离子焊接背面成形

为了考察上述闭环控制系统对等离子小孔型焊接性能的改善效果，选取了三种典型试样对系统电弧的穿透能力、稳定小孔型焊接的适应能力和快速响应能力进行了研究。

(1) 等离子电弧穿透力实验

实验结果表明，采用上述改进后的系统大大提高了等离子电弧的穿透力，在难以穿孔的10 mm不锈钢厚板上实现了稳定的小孔型焊接，如图5.3-104所示，其焊接工艺如下：基值电流150 A，峰值电流180 A，脉冲频率6 Hz，占空比60%，离子气流量为450 L/h，焊接速度为230 mm/min，保护气（Ar）流量为1 200 L/h，喷嘴至工件距离为6.0 mm。



(a) 焊缝正面成形



(b) 焊缝背面成形

图5.3-104　10 mm厚不锈钢板焊缝成形



(2) 稳定的小孔型焊接适应能力实验

对于厚度在 3～6 mm 之间逐渐变化的不锈钢试样，如图 5.3-105 所示。当从薄到厚的焊接过程时，由于穿孔焊接厚度在不断增加，需要线能量和机械挖掘力随之增加，即穿透力的提高，才能满足电弧稳定穿透熔池形成小孔的要求，否则小孔将逐渐减小甚至消失。实验表明该闭环系统能够通过实时调整脉冲参量的变化，自动适应穿孔厚度变化，保证小孔在板厚变化过程中持续稳定存在的焊接要求，使系统具有了良好适应能力，提高了稳定小孔型焊接的使用范围，焊接工艺规范为：焊接速度 260 mm/min，保护气（Ar）流量为 1 200 L/h，喷嘴至工件距离 6.0 mm，电流可在 140～200 A 之间进行调节，离子气流量在 150～250 L/h 之间变动。

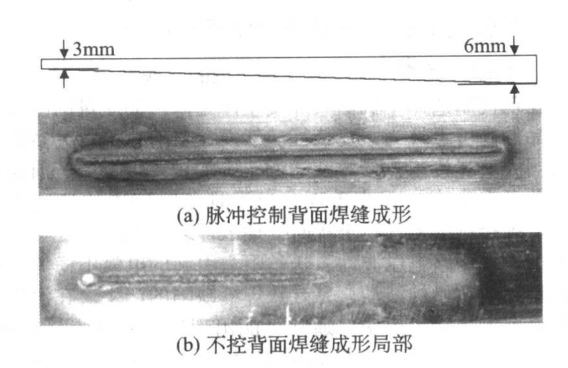


图 5.3-105 渐变厚度试样穿孔焊接背面成形比较

(3) 系统快速响应能力实验

为了测试熔透控制系统对板厚变化的适应能力，特别是对板厚阶跃变化的快速响应能力，对图 5.3-106 所示的不锈钢试样进行了实验。其焊接工艺规范为：焊接速度 260 mm/min，保护气（Ar）流量为 1200 L/h，喷嘴至工件距离为 6.0 mm，电流可在 140～200 A 之间进行调节，离子气流量在 150～250 L/h 之间变动。实验结果表明无论板厚由 6 mm 阶跃减小至 3 mm，还是从 3 mm 突然增大至 6 mm 的过程中，系统都能快速响应，调整电弧穿透力以适应不同板厚的小孔焊接需要，保持小孔焊接的稳定，得到均匀的背面焊缝成形。

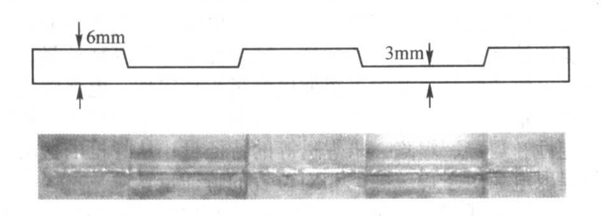


图 5.3-106 厚度阶跃变化试样穿孔焊接背面成形

2.4.3 GTAW 熔池谐振法熔透控制技术

研究表明在定点焊条件下，确定条件和确定尺寸下的熔池具有确实的自身固有振荡频率。熔池的固有振荡频率同熔池尺寸成反比，通过检测熔池的固有振荡频率也就得到了熔池的尺寸。而产生可以利用的熔池振荡需要有外部的激励源、短时的高值脉冲电流激振熔池后检测到的是熔池的自由振荡及其频率，在基值电流之上叠加定频率的正弦波电流构成的变动焊接电流是振荡源的一种，这种情况下的熔池振荡是以正弦波电流频率进行。熔池在某一时刻达到确定的尺寸，其自身固有振荡频率与变动焊接电流中的正弦波频率一致，则熔池发生谐振。熔池谐振通过电弧长度的变化表现在电弧弧光光强的变化幅度或电弧电压变化幅度在熔池谐振点附件出现一定的增幅后迅速衰减，而后又逐渐恢复。此信号可以被用于判断熔池谐振点，并由此通过不同的电流频率来控制不同的熔池尺寸，同时进行反馈控制。低碳钢的熔池尺寸与谐振频率之间的关系如图 5.3-107 所示。

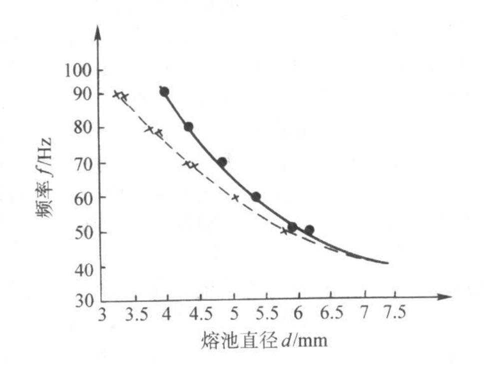


图 5.3-107 低碳钢熔池尺寸与谐振频率有关

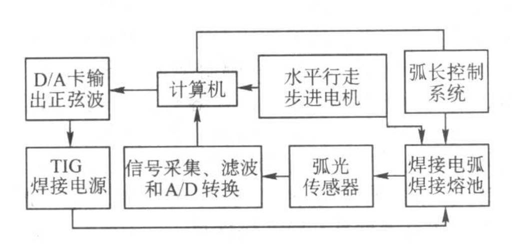


图 5.3-108 熔透控制系统结构简图

熔池谐振法熔透控制系统如图 5.3-108 所示，其中焊件平台的运动由计算机设定，通过驱动器驱动步进电机实现，晶体管焊接电源具有恒流外特性，计算机至焊接电源的电流给定信号包括：焊接基值电流和正弦波电流频率设定后由 D/A 卡给出，低频脉冲峰值时间和脉冲周期由定时计数器控制，给定信号与焊接电源之间的接口电路板产生的正弦波波形与基值叠加，而正弦波峰值即脉冲峰值电流由计算机设定与控制。弧光传感器置于焊枪旁边直接从正面检测弧光的整体光强变化来反映熔池振荡信息，采集到的弧光光强信号经滤波、A/D 转换后由计算机进行数据采集、处理。

焊接开始后，由计算机控制在恒定的基值电流上叠加一定频率的正弦波，熔池以该频率进行振荡，由弧光传感器采集弧光光强变化信号，送入计算机，计算机根据此信号进行弧长调整。随着时间的推移，熔池的尺寸逐渐增大，熔池的固有振荡频率逐渐下降，当熔池的固有振荡频率下降到与附加大正弦波频率一致时，熔池发生谐振。此时的弧光光强信号表现为其变化量幅值逐渐增加后突然下降，当下降的幅值超过阀值 ΔV 时，由计算机发出控制脉冲关闭正弦波，电弧向前移动一步，然后重复前面的焊接过程，直到焊接过程结束（见图 5.3-109）。

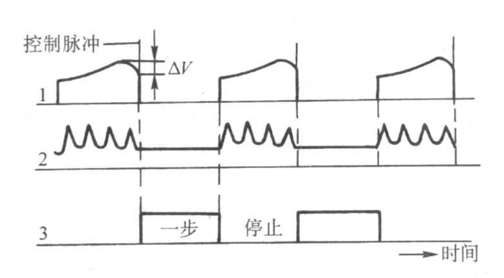


图 5.3-109 熔池谐振法熔透控制过程示意

1—计算机检测弧光光强变动量幅值及给出控制脉冲；2—变动正弦波工作过程；3—电弧步进行走过程

采用熔池谐振法进行熔透控制后的焊缝熔透尺寸均匀一



致，控制精度和可靠性较高。通过改变正弦波的频率可以获得不同尺寸的熔池。

2.4.4 基于神经网络控制的焊缝熔深控制

在弧焊过程中，熔深是最重要的质量参数，熔深不足或未焊透是造成焊接结构失效的最危险因素。因此，熔深通常是电弧焊控制技术所要顾及的最终目标；而精确的焊缝跟踪又是保证焊接质量的关键。由于弧焊过程是一个典型的非线性、强耦合和时变的多变量复杂系统，存在强烈的弧光、烟尘和电磁干扰等不利因素，其动态过程难以用精确的数学模型来表示，熔深和焊缝特征信息的实时提取也较为困难。基于经典数学模型的传统控制方法很难达到较高的焊缝质量。

由于CCD摄像机难以直接获取熔深量，因此比较实际的方法是通过一个能精确描述熔池结构的模型来估算熔深。文献设计一种神经网络模型，通过熔池表面形状、焊接电流和焊缝间隙量来估算熔深量。一般情况下，随着焊接电流的增加，输入至母材的热量增加，熔池表面尺寸增大。如果保持焊接电流恒定，则熔池表面尺寸随着焊缝间隙的增加而减小，熔深随着焊接电流的增加或焊缝间隙的增加而增加。图5.3-110为CCD摄像机摄下的一幅熔池表面图像，G为焊缝间隙量，W为焊炬后端2.25 mm处熔宽。选焊接电流、焊缝间隙和熔宽的变化量作为描述熔深动态系统的参数，并作为神经网络的输入，而熔深作为网络的输出。图5.3-111给出了所设计的三层前馈神经网络模型，根据输入量焊接电流、焊缝间隙和熔宽来推算GTAW熔深量。

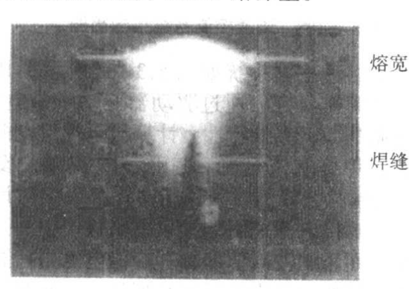


图5.3-110 熔池及焊缝图像

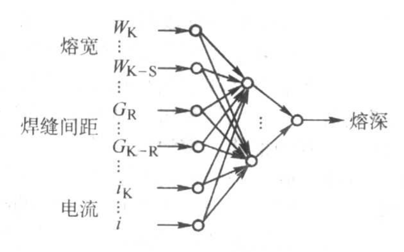


图5.3-111 GTAW熔深神经网络模型

图5.3-112所示为GTAW熔深控制器结构，焊接时由CCD采集熔池及前端范围内的焊缝数据。为消除弧光和周围杂光的干扰，在CCD前使用了一个基于特定频率的窄带抗扰光学滤片。图像处理采用神经网络自适应共振理论模型ART算法，将视觉传感器采集到的熔池和焊缝大量信息进行自组织模式分类并行处理，通过对样本的自学习自组织提炼出模式的内在特征。CCD图像分辨率为512×512，用8位二进制表示为256个灰度级，0对应黑色，255对应白色。将视觉窗口的坐标方向化为128个像元，即4个像素组成一个像元单位。每幅图像作为一组原始数据，按图像灰度值分布归结为若干种空间模式，并与记忆在ART网络中的典型空间模式进行匹配检测，确定出焊缝位置、焊缝间隙量和熔宽。实验条件见表5.3-1。在图5.3-112中，熔深量D由神经网络推算而得，D_h为熔深期望值，e为D和D_h之间的偏差。偏差e可由神经网络输出量计算得出，控制量Δu基于偏差e和偏差e的变化Δe，并应用模糊控制算法得到u，解模糊后用来控制焊接电流来达到控制熔深的目的。

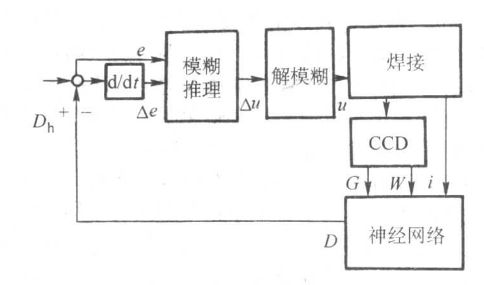


图5.3-112 熔深控制器结构

2.5 焊接过程综合性能评价专家系统

2.5.1 机器人弧焊过程焊缝质量信息的在线判读

在现代制造业中机器人焊接生产是以产品质量的一致性和产品的高可靠性为主要特征。然而，目前在役的大多数弧焊机器人其焊接工艺参数及运行轨迹均是在焊接生产前预先示教并且在生产过程中重现，尚不具备对环境的自适应功能。当焊接过程中存在干扰时，如工件装配间隙的变化、导电嘴磨损、网路电压波动、送丝阻力引起的电弧不稳等，都会出现焊接质量的波动，并导致焊缝缺陷的产生。在汽车零部件机器人焊接生产中，通常可能出现以下几种焊接缺陷，如熔深不足、焊穿、下塌和漏焊等。由于生产过程的节拍快，部件的批量大，因此，在线监测机器人的焊接过程质量成为当前工业界倍受关注的技术之一。

（1）焊缝质量信息检测与判读的基本原理

在汽车零部件机器人焊接生产中，当工艺参数确定后，焊接过程的质量将主要取决于“线能量”和“位置”这两个主要因素。前者反映了焊接过程实际热输入是否能得到所要求的熔透程度，或过量的热输入导致焊穿、下塌等缺陷的发生；而后者则给出了焊枪或电弧的轨迹是否偏离待焊的部位，并由此造成焊偏、焊缝两侧熔深不均匀等缺陷。因此，对焊接过程的焊接电流及电压信号所包含的“能量”和“位置”信息的分析及特征的提取，是对具体生产条件下焊接过程质量监测与缺陷的识别的一个基本思路。

焊接过程的焊接电流及电压波形信号中，具有多信息的相互依存且信息可分解的特点：如从电弧电压的统计分布中可提取熔滴过渡形态、均匀性、稳定性及焊穿等特征量；从焊接电流的统计分布中可提取电弧过程稳定性、电弧轨迹等的特征量；从焊接过程线能量的分布中可提取焊接工艺参数稳定性、焊穿、塌陷、未焊透等的特征量；从焊枪的摆动中可提取电弧对于焊缝空间相对位置的特征量。

熔化极弧焊过程是一个能量输入和质量过渡连续进行的过程。电弧电压及焊接电流的波形受非完全可控的熔滴过渡的影响，具有显著的时变和随机特征，使焊接过程不具有确定的函数表达形式，从而使现有的基于信息的直接建模和质量预报的数学工具难以适用。同时，对其任一瞬间的信息并不具备明确的物理意义及其质量信息的内容，而必须是在足够长的统计时间内对过程的特征信息和规律进行观测和提取。因此，基于统计规则的焊接过程质量信息特征分析是计算机判读中所用的主要手段。

人工智能在信息特征识别与分类、信息的知识化的方面具有独特的优势。在焊接过程质量的计算机判读中，采用了模糊推理方法对统计信息的各种特征进行分类。并实现了对统计时长和特征量阈值的自适应确定。通过缺陷特征及其形成原因的知识库的支持，为焊接过程质量在线评定提供了重要保证。



(2) 焊缝质量信息的实验基础

机器人焊接过程中焊枪以2.5次/s的频率摆动。在CO_2气保护焊的短路过渡电流波形中，可观测到焊枪的摆动及其每个摆动周期中与实际工件位置的偏离程度。图5.3-113所示为经滤波后的焊枪摆动轨迹（a）及其在环缝焊接过程中的实际偏差（b）。这一位置特征信息提供了实际焊接过程的焊缝位置“对中”的质量，以及由此可能导致的焊道两边的熔深偏差。

图5.3-114所示为一个焊接过程的能量波动的分布情况。根据工艺参数设定的范围及其对熔深的影响，以此判断当热输入能量小于下限时，将导致熔深的不足；反之，当热输入能量大于上限且电流、电压波形出现某种异常时，将是下塌、焊穿等缺陷产生的表征。

图5.3-115所示为在线质量检测与判读系统结构示意。以位置信息与能量信息为基础，进一步对可能出现的其他缺陷波形特征进行分析，使焊接质量的在线判读具备了条件。并根据焊接过程信息的特点，采用了模糊寻优和基于拓扑运算规则的高精度判位方法。所有的实验工作及程序的调试均是在生产现场进行的，以保证其工况与生产过程一致，使监测对象和特征信息的条件“锁定”。

(3) 焊缝质量检测的应用结果

根据上述原理及实验的结果，在“桑塔纳”轿车前悬架件机器人焊接生产线的总成工位上，安装了具有同时检测焊接过程“能量信息”、“位置信息”及焊缝质量自动分析与评定功能的监测系统。通过焊缝质量监测仪的显示界面，实时显示出焊接过程焊缝各点的质量状况。根据“合乎使用”的原则，将缺陷尺寸分辨率设定为3 mm。当在焊接过程中有熔深不足等缺陷产生，立即给出“缺陷位置”、“缺陷类别”以及“产生原因”等的信息提示或产生报警信号。

图5.3-116所示为能量、位置与熔深信息三者之间关系的示意。图中的焊缝1是一种由于能量输入不足而造成熔深未达到技术要求的典型情况，常见于焊缝的起弧位置，或网电压不稳、飞溅较大等场合；焊缝2是一种由于焊枪偏离焊缝位置而造成工件的某一边熔深未达到技术要求的典型情况，常见于工件装夹偏差大或工件装配间隙大等场合；焊缝3是能量输入与焊枪轨迹位置均在正常范围内，焊缝熔深达到了技术要求。

2.5.2　基于神经网络的CO_2短路过渡气体保护焊质量控制

基于短路过渡的特点，上海交通大学采用统计方法从电弧电压和焊接电流信号中提取评价参数，尝试了利用神经网络技术获取焊接质量参数，并将生产过程质量控制技术引进焊接生产的质量管理。如图5.3-117所示，评价参数提取系统通过合适的传感器拾取焊接电弧瞬态过程的物理量，将模拟信号转变为数字信号，通过参数提取软件，从中提取出评价参数，并传递给神经网络。

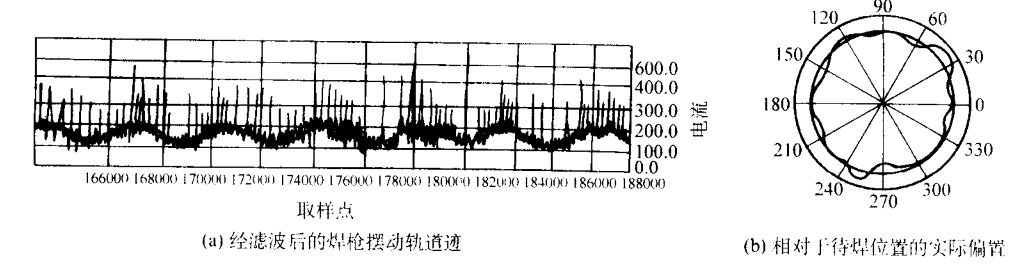


图5.3-113　经滤波后的焊枪摆动轨迹及其在环缝焊接过程中的实际偏差

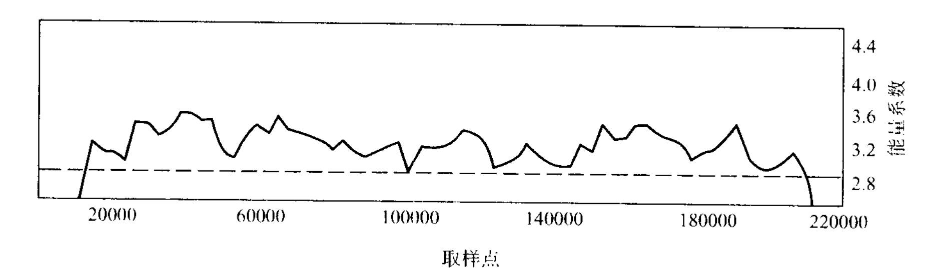


图5.3-114　一个焊接过程的能量波动的分布情况

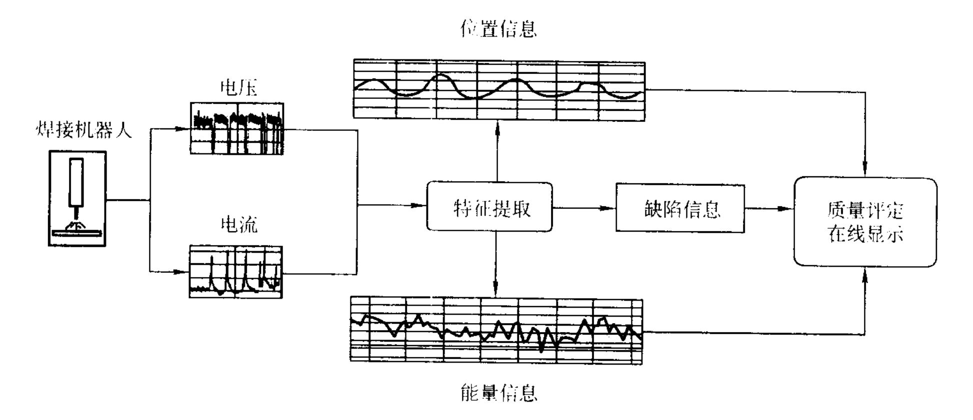


图5.3-115　在线质量检测与判读系统结构示意

采用时域和幅值的统计方法提取电弧信息，得到一组如图5.3-118所示的统计分布图。分析表明利用这样一组概率统计参数：超值电压参数 $C_1 = S_{\text{超值电压}}/S_{\text{总1}}$、低值电流参数 $C_2 = S_{\text{低值电流}}/S_{\text{总2}}$、超值短路电流参数 $C_3 = S_{\text{超值短路电流}}/S_{\text{总2}}$、瞬时短路参数 $C_4 = S_{\text{瞬时短路}}/S_{\text{总3}}$、超时短路参数 $C_5 = S_{\text{超时短路}}/S_{\text{总3}}$和超时燃弧参数 $C_6 = S_{\text{超时燃弧}}/S_{\text{总4}}$，组成一个六维的向量 $\{C_1、C_2、C_3、C_4、C_5、C_6\}$，通过实验证明涵盖了电弧的大部分信息，对焊接质量评价来说是基本完备的。

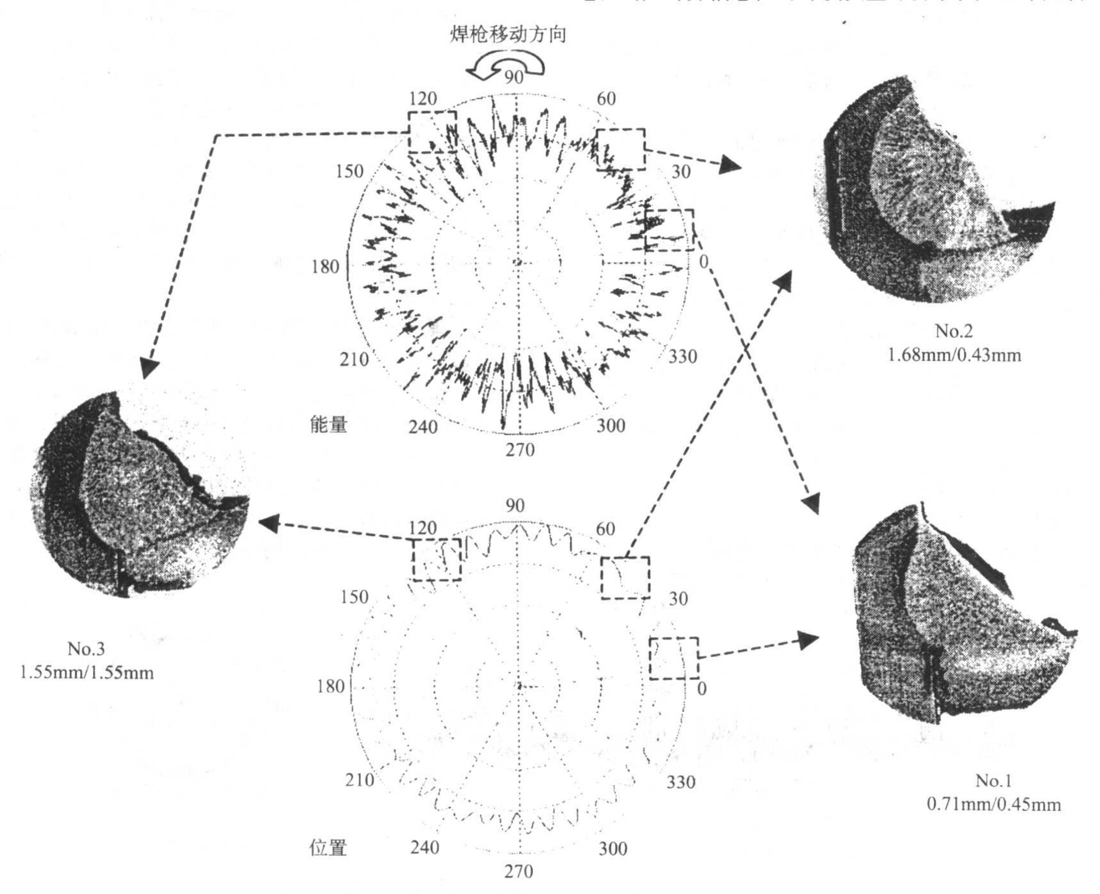


图 5.3-116　能量、位置与熔深三者之间关系

焊接过程　评价参数提取系统　关系模型　质量管理

焊接过程 → 霍尔传感（电流信号）→ 滤波、放大 → 模拟开关 → A/D转换 → 参数提取软件 → 评价参数 → 神经网络 → 质量参数 → 生产管理软件

焊接过程 → 隔离分压（电压信号）→ 滤波、放大 → 模拟开关

图 5.3-117　计算机 CO_2 短路过渡气体保护焊质量控制系统结构图

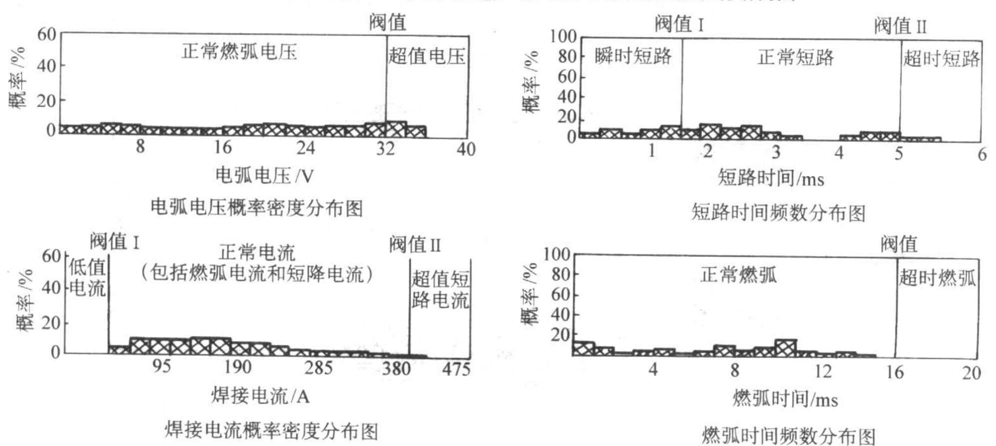


图 5.3-118　电弧信息统计分布图



以上参数是在对概率图形的分别讨论中得到的，但是这些参数实际上是相互关联的，具有一定的相关性，焊接质量是这些参数综合作用的结果，单独考虑某一参数是没有实际意义的。将这些参数作为一个整体向量来考虑则可以反映出实际焊接效果，但是这样的评价方法是抽象复杂的，因此将人工神经网络技术引入焊接质量评价系统。

考虑飞溅和焊缝是影响 CO_2 气体保护焊质量的关键所在，采用飞溅百分比作为评价焊接质量的客观量，以飞溅质量与熔敷金属质量的比值为自变量（并参考焊缝宽度误差百分比，通过 a 的取值加以调整），利用阶跃函数 $f(x)$，设定了从 1～5 的质量等级，定义为质量参数 W：$W = f(m_{飞}/m_{熔} + a(B_{实} - B_{标})/B_{标})$，式中 $m_{飞}$ 为飞溅质量；$m_{熔}$ 为熔敷金属质量；$B_{实}$ 为焊缝实际宽度；$B_{标}$ 为焊缝目标宽度；a 为调节系数；W 为质量参数。

针对 CO_2 短路过渡气体保护焊，采用误差反向传播网络，建立焊接过程统计参数和质量参数 W 之间的关系模型，即用 6 个评价参数 C_1、C_2、C_3、C_4、C_5、C_6 为神经网络的输入层，以质量参数 W 为神经网络的输出层，构造 1 个输入层包含 6 个神经元，1 个隐含层，输出层包含 1 个神经元的，结构如图 5.3-119 所示。

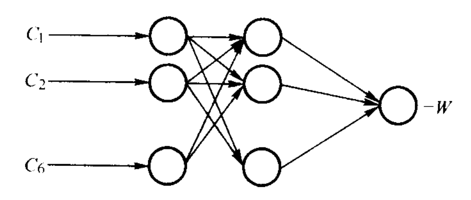


图 5.3-119　BP 神经网络结构图

在 12 L/min 气流量状态下，采用 $\phi1.2$mm 焊丝进行焊接实验，并通过评价参数提取系统得到评价参数，再利用 MATLAB 提供的神经网络工具箱，把实验所得的 12 组数据输入训练好的网络，可以得到网络估测的焊接质量参数 $W_{估}$，并与真实的质量等级 $W_{实}$ 相比较，结果见表 5.3-8。从表 5.3-8 可以看出，在估测值和实际值之间存在着一定的误差，个别点的误差较大，一方面是由于所定的实际值精度不够；另一方面是训练网络的样本数不够。扩大焊接质量的等级数目、增加训练样本数可以减小误差。从总体上看，网络的估测误差一般在 10% 以下，估测结果符合实际情况，因此，神经网络的输出量－质量参数 W，可以作为焊接质量控制的质量指标。

表 5.3-8　神经网络的焊接质量预测结果

序号	电压 /V	电流 /A	焊接质量评价参数						估值 $W_{估}$	实值 $W_{实}$	误差 /%
			C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6			
01	16	60	0	0.796	0	0	0	0.998	4.936	5	1.3
02	16	90	0.023	0.322	0.017	0.443	0.087	0.306	3.155	3	5.2
03	17.5	180	0.132	0.031	0.031	0.472	0.093	0.004	1.927	2	3.7
04	19	140	0.156	0.017	0.013	0.431	0.057	0	1.822	2	8.9
05	19	160	0.264	0.013	0.043	0.519	0.115	0.043	2.189	2	9.4
06	20	120	0.117	0.241	0.790	0.444	0.001	0	3.230	3	7.7
07	20	165	0.273	0.001	0.054	0.501	0.148	0	2.173	2	8.6
08	22	70	0.094	0.497	0.004	0.150	0.150	0.957	4.021	4	0.5
09	22	110	0.201	0.129	0.001	0.335	0.006	0.750	2.758	3	8.1
10	24	180	0.401	0.039	0.067	0.656	0.112	0.001	2.708	3	9.9
11	24	110	0.375	0.382	0.037	0.324	0.008	0.696	4.048	4	1.2
12	24	140	0.403	0.001	0.018	0.829	0.058	0.060	3.095	3	3.0

2.5.3　Kohonen 神经网络在熔化极气体保护焊接质量监测中的应用

某文献采用 Kohonen 神经网络系统来自动识别 GMAW 焊接过程的干扰，从而实现焊接质量智能监测。GMAW 工艺试验条件如下：短路过渡，保护气体为 82% Ar + 18% CO_2，流量为10 L/min。试件为 1 mm 低碳钢板。焊丝直径 1 mm，送丝速度 4.0 m/min，焊接电压 18 V，焊接电流 130 A，焊接速度76 cm/min，导电嘴至工件距离为 12 mm，接头形式为汽车工业广泛采用的搭接。使用汉诺威焊接过程分析仪 AHXV 测量焊接电压和焊接电流，并进行数据处理。每一试验测量 10 s，获得 2×10^6 个焊接电压和焊接电流的瞬时值，并将其实时处理为 *PDD* 和 *CFD* 曲线。试验中，除正常工艺参数下的焊接信息外，还人为引入 7 种干扰信号，即送丝速度增加 10%；送丝速度减少 10%；喷嘴直径增大；两块试板叠加；搭接的两块试板之间有间隙；试板表面有油污；搭接接头中，上面一块试板中间有缺口。对 8 种情况中的每种情况重复 6 次试验测量和数据处理。

Kohonen 网络是自组织特征映射神经网络，可用于解决分类问题和找出数据中的结构。其结构如图 5.3-120 所示，它由输入层和竞争层组成。输入层由 M 个输入神经元组成，竞争层由 $n\times n = N$ 个输入神经元组成，且形成一个二维平面阵列。输入层各神经元与竞争层各神经元之间实现全互连接。Kohonen 神经网络根据其学习规则，对输入模式进行自动分类，即在没有教师示教的情况下，通过对输入模式的反复学习，捕捉住各个输入模式中所含的模式特征，对其进行自组织，在竞争层将分类结果表示出来。输入向量（x_1，x_2，…，x_M）对应于焊接电压 *PDD* 曲线和短路过渡时间 *CFD* 曲线上的数据。焊接电压 *PDD* 曲线上，每一个焊接电压值都对应着一个概率密度值。同样，短路过渡时间 *CFD* 曲线上，每一个短路过渡时间都对应着一个时间频数值。输入向量由 121 个焊接电压 *PDD* 值和 16 个短路时间 *CFD* 值构成，共 137 维。所研制的 Kohonen 网络，特性总数与输入向量维数相同，采用二维结构，共有 55 个神经元。

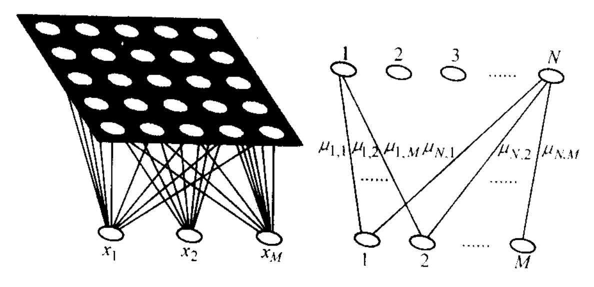


图 5.3-120　Kohonen 网络结构图

如前所述，GMAW 工艺试验分为八种条件，每种条件重复六次试验。前三次的测试结果用来 Kohonen 网络的训练和标识，后三次的测试结果用于对 Kohonen 网络的验证，结果表明总共 24 个试验中，有 22 个识别正确，成功率为 92%。

3　焊接缺陷无损检测技术简介

焊接缺陷的检测是保证焊接产品质量的重要环节之一。随着锅炉、压力容器、化工机械、航空航天器和原子能工程等向高参数及大型化方向发展，工作条件日益苛刻、复杂，对这些焊接结构件的质量提出了更高的要求，否则运行中会出现事故并将造成严重的损失。虽然迅猛发展的现代焊接技术在很大程度上保证其焊接质量，但仍无法保证在制造过程中不产生焊接缺陷，更不能排除产品在运行过程中出现新的缺陷。因而为获得可靠的焊接结构件还必须采用和发展合理



而先进的焊接检验技术。

焊接检验可分为破坏性检验、非破坏性检验两类。破坏性检验固然能提供焊接结构件的材料性能、组织结构和化学成分的定性、定量数据。但由于提供的数据是构件局部或试样的实验结果，其随机性较强；所获数据也只反映构件的系统综合水平，有较大的局限性。而重要的焊接结构件的产品验收和在役中的产品，则必须采用不破坏其原有形状、不改变或不影响其使用性能的检测方法来保证产品的安全性和可靠性，因此焊接缺陷的无损检测技术在当今获得了更多的关注和蓬勃的发展。

焊接缺陷的无损检测方法包括：射线探伤、超声波探伤、磁粉探伤、渗透探伤和涡流探伤，其中射线探伤和超声波探伤适合于焊缝内部缺陷的检测，磁粉、渗透和涡流探伤适合于焊缝表面质量的检验。下面简要介绍用于焊接内部缺陷检测的X射线自动探伤技术和超声波探伤自动技术。

3.1　焊接缺陷的超声波自动检测技术

超声波探伤是利用超声波在物体中的传播、反射和衰减等物理特性来发现缺陷的一种探伤方法。按照不同的标准，超声波探伤可以分成不同类型，见表5.3-9。

表5.3-9　超声波探伤分类表

分类标准	工作原理	显示缺陷方式	超声波波形	声耦合方式
种类	脉冲反射法、穿透法和共振法超声波探伤等	A型、B型、C型和3D型超声波探伤等	纵波法、横波法、表面波法和板波法超声波探伤等	直接接触法和液浸法超声波探伤等

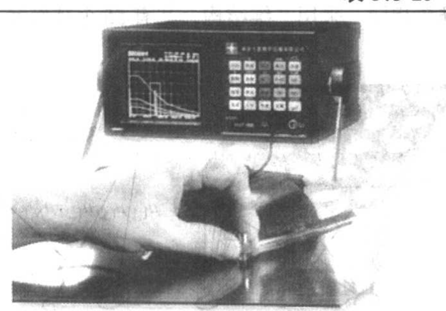
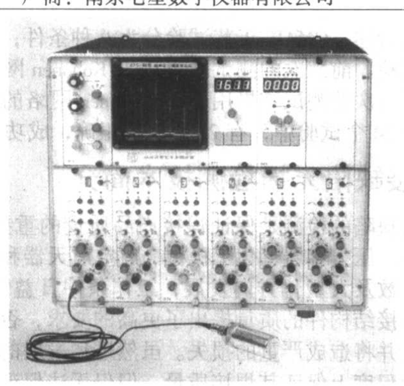
超声检测的历史要追溯到20世纪初。利用超声波探测物体内部的缺陷和结构最早是苏联德萨卡洛夫（Sokolvo）于1929年提出的。1931年德国人在专利中提出了工业应用方案。1944年美国的F.A.Firestone发表了采用超声脉冲法的探伤仪的报告，1946年英国的D.O.Sproule制成A型脉冲反射式超声波探伤仪，并用于钢材的探伤。1964年联邦德国Krautkrä mer公司研制成功小型超声探伤仪，其主要性能指标取得了突破性的进展，标志着跨入了近代超声探伤技术阶段。到了20世纪70~80年代，由于超声全息、回波频谱分析、超声探头和大规模集成电路、计算机技术的迅速发展，数字化、自动化、智能化超声检测技术变成了热点。

目前数字化超声波探伤设备分数字化自动超声波探伤设备和数字化便携式超声波探伤仪两类。前者多是以传统的超声波探伤仪配置微机系统，直接对探伤条件进行数字控制，对探伤数据进行分析和处理，并打印输出探伤报告。同时还可以控制机械装置和工序流程，使生产过程自动化。这就大大提高了自动超声探伤的判伤能力、探伤速度，也解决了多通道的探伤条件的自动调整问题，简化了操作。数字化超声探伤设备主要用于管材、棒材、坯料和板材的自动化探伤。后者是以计算机为核心具有数据处理器的一体化超声波探伤仪，可广泛应用于工作现场和室外探伤，是当今超声波探伤仪器设备的发展主流。表5.3-10给出了部分厂家的新型超声探伤仪器。

现对BLC-201T型超声探头测试分析仪作简单介绍。

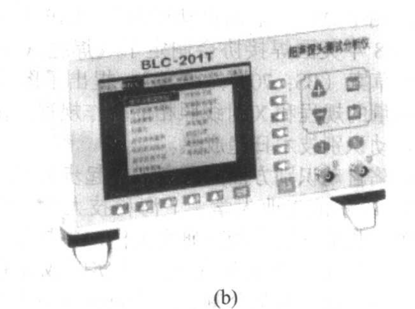
在BLC-2000型数字超声探伤仪的基础上，北京博力加机电技术中心与北京铁路局共同研制的集数字式超声波探伤、探头参数测试两种功能为一体的BLC-201T型超声探头测试分析仪（见图5.3-121）解决了国标中要求的探头参数的测试问题，使探伤者随时可检测探头的技术参数，随时掌握探头所使用后指标变化的情况，以便在探伤过程中进行补偿和矫正，从而减少误探、漏探，使探伤结果更为可靠。

表5.3-10　各种新型超声探伤仪器

 名称：DUT-998数字智能超声波探伤仪 厂商：南京七星数字仪器有限公司	 名称：EPOCH Ⅲ 2300超声波探伤仪 厂商：美国泛美（Panametrics）
 名称：CTS-46型六通道超声波探伤仪 厂商：广东汕头超声电子股份有限公司	 名称：DUT-998数字智能超声波探伤仪 厂商：ACS（Acoustic Control System）



(a)



(b)

图 5.3-121　BLC 公司数字化探伤机

该仪器利用软件将数字式超声波探伤与探头参数测试功能组合为一体。按照国际 ZBY231—1984《超声探伤用探头性能测试方法》规定的测试方法，采用石英晶片固定试块、1 号标准试块、对比试块，完成探头参数的测试。

（1）技术特点

1）功能兼用　一机兼有探头参数测试分析和数字化超声波探伤两种功能。

2）高速数据采集和多相位采集技术。

3）自动提示探头测试过程，直接显示探头测试结果。

4）中、英文菜单转换。

5）6″液晶显示屏，800 × 640 高精度显示。

6）超大容量存储能力，可存储 2000 幅数据及波形。

7）可连接大型显示器、标准键盘和任意机型的打印机。

8）体积小，质量轻，抗干扰能力强，适合于流动现场及多工种集中作业的现场。

（2）基本功能

1）可按 ZBY231—1984《超声探伤用探头性能测试》标准规定检测探头的技术参数，如下。

直探头测试参数：相对灵敏度、回波频率、分辨力、始波宽度、声轴偏移、声束宽度、回波长度、距离 - 幅度特性、等效阻抗等。

斜探头测试参数：相对灵敏度、回波频率、分辨力、前沿距离（弧面 $K = 0.7 \sim 1.2$，平面 $K \geqslant 1.3$）、折射角（弧面、平面）、空载始波宽度、声轴偏斜角、声束宽度、回波长度、入射点、K 值、距离 - 幅度特性、等效阻抗等。

双晶直探头测试参数：相对灵敏度、回波频率、楔内回波幅度、声束交区宽度、回波长度、距离 - 幅度特性、等效阻抗等。

水浸探头测试参数：相对灵敏度、回波频率、声束宽度、回波长度、距离 - 幅度特性、等效阻抗等。

小角度探头测试参数：相对灵敏度、回波频率、分辨力、前沿距离、折射角（$6° \sim 8°$）（$9° \sim 11°$）、空载始波宽度、声轴偏斜角、声束宽度、回波长度。

2）全中文菜单式界面，自动提示探头测试过程，直接显示探头测试结果。

操作简单、方便、直观、易掌握。为方便探伤人员的操作，屏幕菜单将提示操作人员测量时需要的标准试块、波幅调试的高度等测试过程要求，操作人员无需记住测试过程，只需按屏幕上的提示去做即可完成测试，测试结束后，测试结果将自动显示在屏幕的右上方。探头测试时，屏幕出现主菜单，按动屏幕下方对应的键选中检测项目，主菜单中弹出检测项目的子菜单。操作者按动屏幕右边的键选择相应的测试参数，屏幕将出现与该测试参数相关的界面。

3）数据处理与管理功能　存储：操作者可键入探头编号，测试条件等相关内容，也可以对所存储的文件进行补充和修改。

删除：可对选中的文件进行删除，为防止误操作，屏幕将提示操作者对删除文件进行确认。

查询：按探头编号将所存储的文件方便的调出进行查看。同时可自动提示所查询的文件是否在存储中。

修改：可以按探头编号将文件调出，把重新测试内容添加进去，将原内容覆盖，覆盖之前将得到确认。

查看及打印测试结果：能够查看探伤结果和探头测试结果，也可选择文件编号对结果按针打、激光、喷墨等不同打印机型进行打印。

4）可配置网络型技术平台　主机不仅可以独立地进行实际探伤操作，还可以与外围配件组成强大的探伤结果处理系统。通过软件与其他计算机联网可以方便的通过局域网进行数据传送，实现数据后处理和大容量存档，还可以利用一台计算机对多台主机进行自动遥控，实现远程管理和控制。

5）超声波探伤仪功能　进波、失波双闸门自动报警；可制作并存储 100 组距离波幅曲线，具有距离波幅补偿功能；对波形自动进行定量；B - 功能扫描；动态峰值包络功能；射频显示功能。

（3）主要技术指标

中央处理器：PC104。存储：超大容量（2 000 幅数据或波形）。距离读数：0.1 mm 分辨率的声程。采样频率：40 MHz，3 相位。频率范围：0.5 ~ 15 MHz。键盘：触摸式键盘，标准键盘。外形尺寸：110 mm × 120 mm × 260 mm。质量：3.0 kg。工作温度：－25 ~ 50℃。电池寿命：4.5 h（25℃）。超声波探伤仪灵敏度：110 dB，分辨率 0.1 dB。水平线性 ≤1%。垂直线性 ≤3%。电噪声电平 ≤10%。动态范围 30 dB。衰减器衰减量误差：每 12 dB 不超过 ±1 dB。最大使用灵敏度 ≤400 μV。探头频率测量误差 ≤3%。

3.2　焊接缺陷的 X 射线自动探伤技术

X 射线探伤的实质是根据被检工件与其内部缺陷介质对射线能量衰减程度不同，而引起射线透过空间后的强度差异，使缺陷能在射线底片或 X 射线电视屏幕上显示出来。多年来焊接缺陷的 X 射线检测都是通过 X 射线探伤机拍取底片，然后用肉眼观察底片来评判焊接质量。这对于要求检测率比较高的锅炉、压力容器等重要焊接结构，不仅检测工作量大，检测成本高，周期长，而且检测水平直接受检测者主观因素的影响而不稳定。为此国内外在焊缝缺陷自动检测方面开展了大量研究工作。

1968 年日本东京大学的 Y. Shirai 首先提出了焊缝 X 射线自动检测的方法，其算法主要用于提取边界特性及其相关参数，用于检测焊道和焊接缺陷，但效果一般。1979 年日本井上胜敬研制了一个能够适用于较差环境的焊接图像在线处理系统，应用效果良好，对实现焊接缺陷的自动检测具有一定的实际意义。1982 年井上胜敬又提出了焊接缺陷自动识别与分类系统，在识别系统中，采用统计方法计算缺陷的五个特征参数，然后通过与学习系统得到的特征参数进行比较，从而判别缺陷的性质。1983 年，British Journal of NDT 杂志刊

登了“在X射线检测中焊缝缺陷的自动识别”，提出了三个实时处理系统。1988年英国焊接协会制定了《焊缝X射线实时检测应用指导草案（BS：7009：1988）》，提出了图像质量标准化和缺陷测量的规程和X射线照相的操作规程，使X射线实时检测及自动识别技术日趋成熟。

我国在焊缝缺陷自动识别方面的研究工作起步较晚。20世纪80年代初期，哈尔滨工业大学、上海科技大学、杭州电子工业学院等单位相继开展了相关研究工作，并取得了较好的效果。1993年，甘肃工业大学在X射线实时成像系统的基础上，利用图像处理、缺陷分割、模式识别和图像数据库技术，研制了一种按照GB 3323—1987评片的自动评片系统。该系统具有X射线实时成像、探伤图像获取、缺陷检出、缺陷识别、几何尺寸测量和自动评片等功能，并自动生成探伤报告。基本实现了X射线的探伤及评片过程的全部自动化。

焊接缺陷的X射线自动检测及评片系统的硬件结构如图5.3-122所示。从图中可以看出，从X光源发出X射线穿过焊缝区后，经图像增强器转化为可见光，由摄像机摄取的全电视信号经图像卡量化为具有256级灰度的数字图像存储在图像卡的帧存体内。捕获的图像信息随时显示在彩色图像监视器上，并可将图像存入硬盘以备调用。然后通过图像增强、缺陷提取、模式识别及自动评片系统完成X射线探伤的实时成像和自动评片全过程。

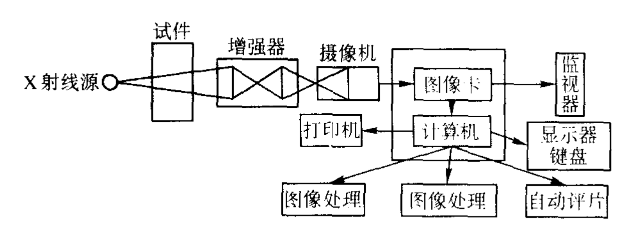


图5.3-122　焊接缺陷的X射线自动检测及评片系统

采用图像处理及模式识别的方法对焊缝缺陷进行检测、识别及评级会使焊缝缺陷的检验实现自动化，这不仅会大大减轻探伤工人和评片员的劳动强度，减少误判，提高评判效率，而且能大量减少原材料消耗，具有良好的经济效益。随着相关技术的发展，焊缝缺陷自动检测系统将更加成熟、可靠，在生产实践中应用将愈加广泛。

编写：陈　强（清华大学）
孙振国（清华大学）

第 4 章 焊接生产自动化设备设计要点与实例分析

现代焊接自动化设备集成了机、电、光及微机控制技术，大都是机电一体化的高新技术产品。显然，要设计出这种机电一体化的自动焊专机就必须具备一定的焊接工艺知识、机械设计制造知识、微电子及微机控制知识，另外也应熟悉掌握现有的焊接设备，包括各种焊接电源及通用焊机，如 CO_2 气体保护焊机、埋弧焊机、TIG 焊机等。实际上，就一个人而言是难以掌握上述全部知识的，一般需要由一个项目组分工合作来进行自动焊专机设计工作，但作为项目组长至少要对现场的焊接工艺与设备有足够的实践经验与一定的理论知识，才能设计或研制出先进、实用、可靠的自动焊专机。

为了说明如何应用现代光、机、电、微机技术来设计工程实际需要的自动焊专机，本章先简要阐述自动焊专机的设计步骤与要点，然后通过介绍一系列实例来说明具体的设计方法，包括如何设计整机、如何改造设备，以及如何将焊接工程问题转化为微机控制系统的问题进而实现焊接设备的自动化与智能化。

1 焊接自动化设备设计步骤与设计要点

与各种机电一体化设备的设计过程一样，在设计一种专用的自动化焊接设备时，必须经过以下主要步骤：调研；总体方案论证与设计；功能模块设计；控制系统设计；功能模块制造、调试与改进；整机系统集成、调试与改进；工艺试验与改进；可靠性试验。

如图 5.4-1 所示，上述各步骤都有若干设计要点。即，为了保证能设计出先进、实用、可靠的自动焊专机，以及少走弯路、提高研发效率，应注意以下设计要点。

（1）调研阶段的工作要点

1）要在现场了解焊接产品的生产全过程，分析要实施自动化焊接时的有利与不利条件以及技术难点，为进一步调研与方案讨论提供方向。

2）充分收集国内外相关资料，着重分析与本设计难点相应的可借鉴技术措施，包括整机的情况与局部的情况。如要解决自动跟踪问题，则应了解国内外各种现行的或可行的焊缝跟踪方法。

3）在可能的情况下，到同行或有关单位进行参观学习与交流讨论，如能进行一定的模拟试验则更有利于深入分析设计中的技术难点。

（2）总体方案设计的工作要点

1）总体方案必须由项目组成员反复讨论制定，项目组成员应由掌握焊接工艺、机械设计、电路设计与微机控制等方面人员组成。

总体方案是整个设计的关键，总体设计思想不明确或不正确，以下各具体的设计工作就无法顺利进行，所以应允许项目组成员集思广议提出多种方案进行比较分析后才能确定。

2）总体方案必须有创新。总体方案既要借鉴现有国内外设备的长处，又要避免盲目仿制的做法，要针对设计中要解决的技术难点等关键问题，提出新措施、新想法，要坚持走自己的路，唯有创新，才有进步，才有特色，才能使设计的新设备有生命力。应该说，总体方案的创新性是整个设计工作成败的关键。

3）总体方案必须进行充分论证。论证的方法可以包括以下几种。

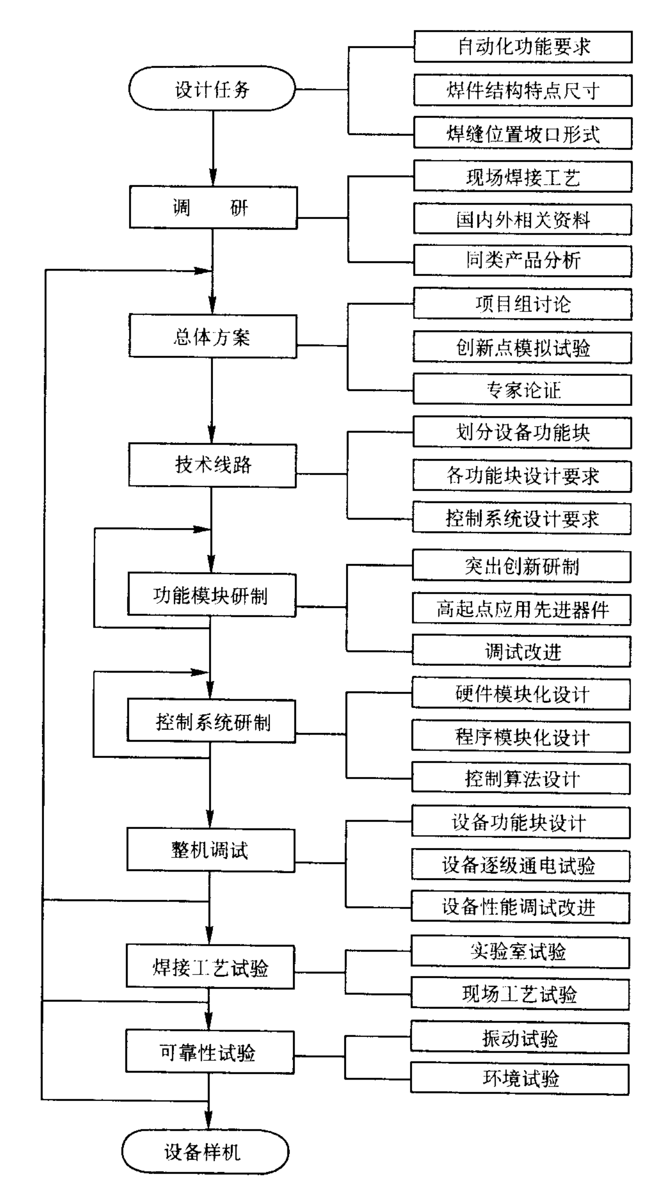


图 5.4-1 焊接自动化设备设计方法示意图

① 模拟试验 主要是对设计中的关键问题进行原理性的模拟试验，以分析总体方案在技术上的可行性。如在下一节设计无导轨全位置焊接机器人的实例中，拟定了以磁轮式行走机构为创新点之一的总体方案后，首先要做的模拟试验就是要实测磁轮的吸力及在球面上的运行情况。

② 仿真试验 在有条件的情况下，可利用三维机械设计软件（如 Solidage，UG，4D Motion 等）进行三维动态仿真，展示其机构组成、运动规律以及分析设计方案的合理性与可行性。

③ 专家论证 邀请同行专家进行评论，往往专家指出的疑点、问题，正是设计方案中不足之处，则要继续下功夫调研、模拟试验和仿真试验，直到大多数专家认可。

（3）技术线路的制定要点

技术线路的任务是确定设备设计或研制工作的具体实施方案，此时主要注意以下三点。



1）将整机分成若干模块，如机头、摆动机构、行走机构、跟踪机构、控制系统等。

2）根据焊接自动化工艺要求确定各功能模块的设计要求、性能指标及相互配合等定量关系。

3）采用微机控制系统时要将焊接设备的控制要求转化成对微机系统的具体设计要求，包括对I/O口，控制响应速度、硬件与软件的接口关系等。

（4）功能模块设计要点

如在设计机头调整机构、摆动机构可考虑选用已经工业化生产的滑块机构与驱动电机供应商（如美国 Parker 公司，天津市维杰电器设备公司等，北京的北成新公司等），在设计微机控制系统时可考虑选用大批量生产的微机控制模块或单片机应用板（如西门子公司的 S7－200 系列 PLC 模块，不但可靠性好、实用性强，容易与各种电机驱动电路连接，其指令执行速度为 0.37 μs/指令，足以对设备进行实时控制；又如启东计算机厂开发的 SCB 系列应用板，已有十余年的生产历史，其性能稳定，价格低廉，能满足小型自动焊专机的需要）。事实证明，通过调研、上网查询等各种途径，力求选购到合适的工业化产品模块是设计工作事半功倍的一个主要措施。

（5）控制系统设计要点

1）提高硬件电路设计可靠性

① 选用模块化的控制电路。如采用已商品化的各种步进电机、直流电机、交流伺服电机的驱动电路。这样不但提高整个控制系统的可靠性，而且可以大幅度简化控制系统硬件与软件的开发工作量。

② 硬件连接要注意处理好接地点、屏蔽线、分开强弱电线避免干扰（特别是中频开关电源或交流伺服电机驱动电路易对控制线产生干扰），以及接插件的可靠性等常见问题。

③ 必须采用可靠的计算机稳压电路、看家狗电路及相应的程序等。

2）软件设计采用子程序模块化结构。注意每个子程序模块只要完成一个功能，要尽量短小精干，以简化结构便于设计与调试。在采用中断技术时更要尽量缩短其长度，以免发生多次中断嵌套或程序运行不畅等不良现象。

3）控制算法要简明实用，尽量减少复杂的计算过程以提高系统的实时控制性及降低编写与调试程序的难度。如对于设备惯性较大时采用一般的 PID 算法甚至 PI 算法就可以满足性能要求，而 PI 参数的确定可以根据设备响应速度（或运动速度）来估计及在调试中逐步逼近的。由于焊接速度大都在 20～50 cm/min 的范围，所以 PID 的控制周期在几十毫秒就足够了。又如，在下一节设计全位置焊接机器人的实例中，采用信号处理电路，将 CCD 对轨迹线的检测信号转化为模拟量信号，就可以大幅度减小控制系统 CPU 的工作量，既简化了程序又提高了控制实时性。

（6）样机调试工作要点

1）先进行功能模块的性能试验。此时注意：在通电前反复检查电源线、接地线的正确性；以电源模块开始逐级加电，如在电源模块输出无误时，再接通控制模块，再逐个接通运动模块。切记！千万不能对所有模块同时加电！以免发生万一。

2）整机试验必须在各功能模块与传感器通电无误的基础上进行，不能操之过急。调试时先定性试验，观察整机动作的协调性、正确性。然后，定量试验，通过对程序控制参数的调节与定标等措施来减小累积误差，提高控制精度，实现性能技术指标。

（7）工艺试验要点

为了使设备满足焊接工艺实际，必须由有经验的焊工参与工艺试验，如能参加整个设计过程则更好。实践表明，设备的许多技术细节，如焊机的操作性能、焊枪的调整性能等都是通过工艺试验才能改进与完善的。经验还表明，受到焊工欢迎的设备才是真正成功的设备。

（8）可靠性试验

设备可靠性首先是建立在器件、模块可靠性的基础上的，但在组装后为了保证整机的可靠性，最好再进行以下可靠性试验。

1）振动试验。在专用的振动试验台进行 12 h 以上振动试验，以考核设备经受长途运输的能力。

2）环境试验。在环境试验箱中，对整机或控制系统进行 12 h 的加温、加湿试验，试验时设备通电运行。此试验按国家标准进行，也可按用户实际需要进行。

最后要说明的是，上述设计步骤与要点的基本宗旨是实现自动化焊接设备的先进性、实用性与可靠性，以解决焊接产品自动化的实际问题。

2　自动化焊接设备整机设计实例

2.1　球罐全位置焊接机器人设计

（1）设计目标

随着我国经济的高速发展，石化用球罐等容器的体积容量以及数量也正在快速增加，按目前的增长速率估计，仅石化部门每年要新建球罐容量几十万立方米。目前国内球罐焊接生产的现况还是主要依靠手工焊，其效率低、工期长、成本高、工人劳动强度大、技术培训周期长，因而迫切需要发展推广自动焊接技术，来提高施工的速度与焊接质量，进而提高我国球罐焊接制造业的国际竞争力。

近年来一些企业已引进国外的轨道式自动焊机，并研究 CO_2 气体保护药芯焊丝（FCAN）的全位置多层多道焊等先进的工艺方法。这些引进的轨道式自动焊机，能明显提高焊接效率，但也带来导轨安装麻烦费时，焊工需要密切注视焊缝熔池不断调节焊枪的人工跟踪焊缝等问题。

为了解决上述问题，研制了一种新型的球罐全位置焊接机器人。其研制目标主要如下。

1）全自动完成球罐的焊接过程，在多层焊接时由焊机进行实时跟踪。鉴于在野外焊接球罐时施工环境恶劣，实现全自动焊接不但能保证焊接质量，降低劳动强度和施工成本，而且能大幅度降低操作技术难度，解决球罐焊工培养困难、流失严重等问题。

2）实现无导轨全位置焊接球罐焊缝，即焊机无需导轨支持就能直接在球罐表面上进行全位置自动行走与焊接。这一方面可简化焊前准备工作，提高生产效率；另一方面可节省导轨所耗费的大笔费用。

在研究球罐高效自动焊设备与工艺的过程中，需要解决的关键技术问题是：自动跟踪控制技术、无导轨全位置行走机构，以及全位置药芯焊丝焊接工艺。这些关键技术的研究情况如下。

（2）无导轨全位置行走机构研究与设计

1）技术难点与方案分析　大型钢制球罐的直径一般在 10 m 以上（常用的 1 000 m^3 球罐，直径为 12.4 m），壁厚在 18～42 mm，需要在球罐内外进行双面多层多道焊，想要不用导轨支持就能直接在球罐表面上进行全位置自动行走与焊接，这在国内外尚无先例。可以借鉴的机构有磁性履带式爬壁机器人（如哈工大机器人研究所的爬壁机器人），真空吸附式爬壁机器人与毛毛虫式爬壁机器人。其中，磁性履带式爬壁机器人最接近可行方案，但尚有以下难以解决的问题。

① 履带式爬壁机器人是间接受力机构，当爬行坡度大于 90°时，其运动就不稳定可靠，更不可能在仰焊位置工作。即，磁性履带式爬壁机器人难以实现在球罐上全位置行走；



② 多层焊时要求焊车不断启停以配合焊枪摆动，按 30 cm/min（5 mm/s）焊速计，若摆动速度 30 次/min，则焊车差不多每秒要停 1 次，或每移动 5 mm 停 1 次，而且要移动均匀。由于履带的每段长度大于 20 mm，上述运动要求对于磁性履带式爬壁机器人来说又是一个难题。

③ 自动焊时还要求焊车行走机构必须能在球面上迅速拐弯或纠偏，以便跟踪焊缝，这也是磁性履带式爬壁机器人很难做到的。

为此，考虑采用磁轮式行走机构方案。但磁轮机构的主要难题如下。

a）轮与球罐的接触面积很小，其磁力不知能否足够。如采用四轮机构的话，就只有四条线与球面接触，实际上还可能仅仅是若干个切点接触。

b）为了增加磁吸力，可以考虑增加磁轮，但要保证各轮在任何时刻同时接触球面（这要比四轮同时接触平面或柱面更难）。

试验表明，采用高磁密材料制成的永磁轮有极大的磁吸力，研制的四个永磁轮机构吸力已超过 200 kg，在垂直面上的负荷力超过 50 kg。若采用六轮机构反而增加工作的不协调性。

据此，采用柔性磁轮式行走机构研制方案较合理，其研制要点是设计柔性的四轮连接结构，保证四轮在任何情况下同时接触球面，使其工作稳定可靠。

2）柔性磁轮式爬行机构结构组成与工作原理　如图 5.4-2 所示，研制的四轮柔性机构采用行车式车体结构，主要由底架 1 与左右二侧磁轮座 5 组成，底架与二侧磁轮座间通过铰链机构 2 连接。左右磁轮座中的前后磁轮 3 由各自的伺服电机通过减速器驱动。

此行走机构的基本工作原理如下。

① 四轮柔性连接，左右二侧轮架能相对偏转，自动保证同时接触球罐表面。

② 各轮与钢板封闭磁路，磁力达到 200 kg 以上。

③ 四主动轮结构，保证全位置行走均匀可靠。

④ 左右磁轮可进行差动工作，可实现迅速拐弯，甚至原地转动。

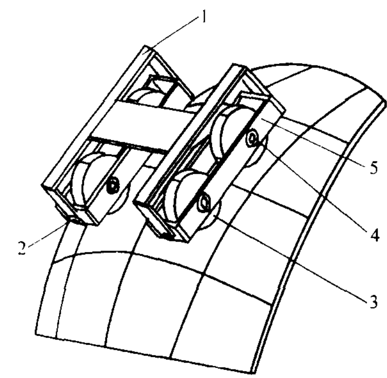


图 5.4-2　柔性磁轮机构原理

1—底架；2—铰链机构；3—磁轮；4—磁轮轴承；5—磁轮座

此行走机构的力学分析可简化为图 5.4-3 的情况，通过推导可得到机构在全位置稳定运行的基本条件为：

$$F_a > \frac{W}{4f_s}$$

式中，F_a 为磁轮吸力；W 为焊车重力；f_s 为钢板与磁轮间的静摩擦系数。

试验结果表明，磁轮机构吸力超过 200 kg，能满足全位置工作条件。

（3）多层焊自动跟踪系统研究

1）技术难点与可行方案分析　焊缝实时跟踪技术是国内外学者的研究热点，其研究方案主要有：基于 CCD 传感器直接检测弧焊区的视觉跟踪法，采用接触传感器的记忆跟踪法；采用旋转电弧传感器的实时跟踪法，以及示教跟踪法等，但要想将上述跟踪方法用来对球罐全位置多层多道焊缝进行实时跟踪，尚有以下技术难点。

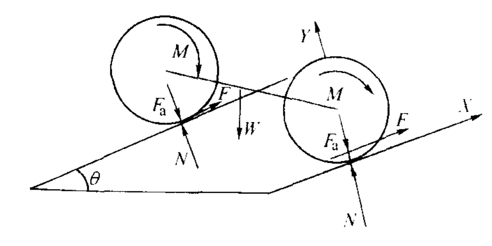


图 5.4-3　磁轮机构受力分析

F_a—磁轮吸力；F—磁轮摩擦力；M—磁轮转矩；N—球板反支力；W—焊车重力；θ—球板坡度

① 焊接电弧强烈干扰，难以检测焊接熔池实际位置。

② 多层焊跟踪时，难以检测第一层焊缝之后的各层焊缝图像。

③ 多道横焊跟踪更困难，由于是不摆动逐道叠加焊，故第一道焊缝后，就难以实时检测以后各道的焊缝位置，这包括较成熟的旋转电弧法。

④ 球罐焊缝是弧形曲线，若用导轨焊机自动跟踪法，导轨不可能与焊缝完全平行，只有采用记忆跟踪法。作者的研究表明，导轨焊机记忆跟踪法虽然能达到一定的精度，但存在有需要标定起点、不能中间断点复位等问题。

为此，研究了一种用 CCD 光电跟踪焊缝轨迹线的可行方案，其结构组成与工作原理如图 5.4-4 所示。

2）焊缝光电跟踪系统结构组成与工作原理　如图 5.4-4 所示，此系统主要由 CCD 传感器、微机测控系统及步进电机驱动的滑块机构组成，系统通过 CCD 光电传感器识别在球罐表面的坡口平行轨迹线 1，由滑块 4 带动焊枪 7 实时跟踪焊缝 8。由于是依照坡口平行线实行非接触跟踪，在多层多道焊接的情况下也能进行重复自动跟踪。

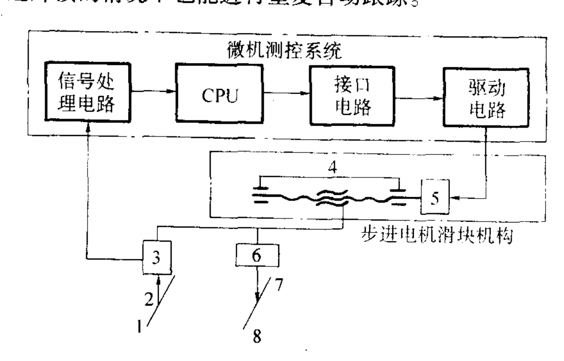


图 5.4-4　CCD 光电跟踪系统原理图

1—坡口轨迹线；2—光信号；3—CCD 光电头；4—滑块机构；5—步进电机；6—焊枪摆动机构；7—焊枪；8—焊接坡口

3）CCD 光电传感器　研制的光电检测装置主要由 CCD 光电传感器与信号处理电路板两部分。CCD 光电传感器结构如图 5.4-5 所示，包括：线阵 CCD 芯片 4、透镜 6、光源 8、滤光片 7、镜筒 5 与滤光罩 9。

信号处理电路包括：驱动电路 3、二值化电路 2 与模拟量信号处理电路 1。

在光源照射下，焊缝轨迹线通过透镜在线阵 CCD 芯片表面成像，由线条影像处的 CCD 像元信号电压变弱，此信号电压经过二值化电路处理就能产生约 5 V 的负脉冲电压信号，将此负脉冲信号在模拟量信号处理电路进行处理及 D/A 转换，可以获得一个模拟量信号电压，以反映焊缝轨迹线与传感器中心线间的偏差。



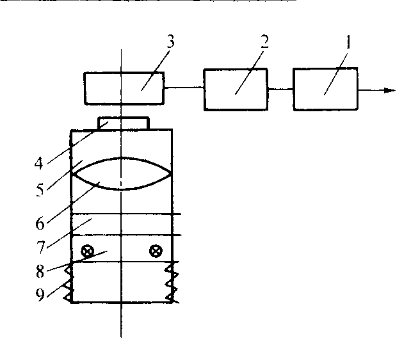


图 5.4-5　CCD光电传感器结构组成

1—模拟量信号处理电路；2—二值化电路；3—驱动电路；4—线阵CCD芯片；5—镜筒；6—透镜；7—滤光片；8—光源；9—滤光罩

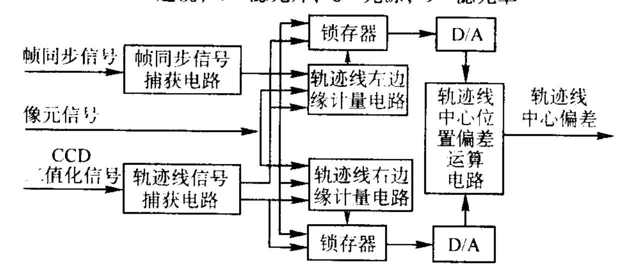


图 5.4-6　模拟量信号处理电路原理

图5.4-6为模拟量信号处理电路原理。信号处理板接收到CCD二值化信号后，由帧同步信号捕获电路得到CCD帧同步信号，由边缘捕获电路得到轨迹线的左右边缘信号。在这些信号共同作用下，通过左右边缘计量电路获取左右边缘量，经锁存器锁存，送D/A转换后，通过轨迹线中心位置运算电路计算出轨迹线中心位置偏差，并以模拟量的形式输出。

4）轨迹线的实时检测工作流程　在光源照射下，轨迹线通过透镜在线阵CCD芯片表面成像，成像电荷与CCD芯片表面感光强度成正比。由轨迹线所反射的光线较背景处弱，所以轨迹线在CCD芯片表面成像处的像元信号电压较背景处弱。像元信号经过二值化电路处理就能产生5 V的负脉冲电压信号，负脉冲的宽度正比于轨迹线的宽度。将此电压信号经模拟信号处理板，可以获得一个正比于轨迹线中心偏差量大小的模拟电压。轨迹线中心在由以CCD芯片为核心的传感器中心左侧0～14 mm时，输出电压信号相应为0～+2.5 V，左偏差量大于14 mm时，输出电压信号保持为+2.5 V；轨迹线中心在由以CCD芯片为核心的传感器中心右侧0～14 mm时，输出电压信号为0～-2.5 V，右偏差量大于14 mm时，输出电压信号保持为-2.5 V。

5）光电跟踪执行机构　系统采用直线型滑块机构来执行光电随动跟踪，其有效行程100 mm，位移精度0.023 mm，直线精度0.022 mm，最高滑移速度350 mm/s。滑块机构由永磁式两相步进电机驱动，采用微细步驱动器后，电机分辨率可达5 000～20 000步/转，系统跟踪精度可达到±0.5 mm。

6）光电跟踪工作流程　系统采用两级随动跟踪方式，当焊接坡口平行线与传感器中心线间有相对偏差时，首先由柔性磁轮式行走机构对焊车位置进行粗调，然后由光电跟踪滑块机构对焊枪位置进行精调。在粗调过程中，微机控制系统根据两个CCD光电传感器的测量值对焊车的左右行走电机发出差动信号，使焊车随动拐弯，直至焊车中心线与焊接坡口中心线基本一致。在精调过程中，微机控制系统根据后一个CCD光电传感器的测量值对光电跟踪滑块机构的步进电机发出驱动信号，使焊枪随动跟踪坡口中心线。

（4）微机智能控制系统

1）系统组成　如图5.4-7所示，球罐焊接机器人的微机控制系统硬件主要由S7-200型PLC微机控制器与各传感器、电机的接口电路组成。采用的PLC模块有：CPU模块、I/O模块、A/D与D/A模块。

自制的接口电路中，CCD信号处理电路的作用前已述及；电位传感器信号处理电路的作用是对信号电压进行调理、定标处理，以符合A/D模块的输入要求；步进电机控制信号转换电路的作用是，将PLC模块输出的电压信号转换成相应的脉冲信号，以符合步进电机驱动器的输入要求；直流电机双向驱动电路的作用是，将PLC模块输出的PWM脉冲信号变换成直流电机驱动电压，并按PLC模块输出的控制信号改变电流方向。

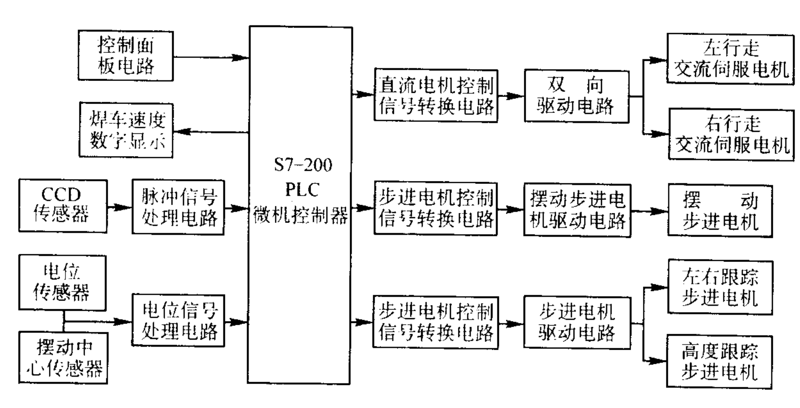


图 5.4-7　机器人微机控制系统电路组成

2）系统工作流程　控制系统的主要工作过程如下。

① 随时可调节面板上各旋钮进行参数设定与调整，包括手动调整焊枪位置等拨钮操作。

② 在焊接过程中，按CCD光电传感器测量信号，实时控制焊车与焊枪摆动中心位置，对焊接坡口平行线进行自动跟踪。

③ 在焊接过程中，按接触电位传感器测量信号，实时控制焊枪高度位置，对焊接坡口进行高度跟踪。

④ 焊枪摆动机构按设定方式与参数值进行自动摆动，并保持摆动中心稳定。

⑤ 焊后可自动回车，此时焊车按CCD光电传感器测量信号对焊接坡口平行线进行自动跟踪。

（5）全位置焊接工艺试验研究

在上述工作基础上，研制了球罐全位置焊接机器人成果样机，并用此样机进行了全位置CO_2气体保护药芯焊丝自动焊工艺研究，得到了满意的结果。

1）焊接工艺评定试验　按JB4708—1992标准作了立焊与横焊工艺试验。在焊接过程中，机器人工作稳定，自动跟踪性能可靠。试件焊缝成形美观，经X光检验与力学性能检测，焊缝质量良好，符合标准要求。



① 试验方法　采用药芯焊丝 CO_2 气体保护焊。焊丝为北京钢铁研究院生产的 GL－YJ502（Q）气体保护药芯焊丝，丝径 1.2 mm。试板为 16MnR 钢，长 550 mm、宽 300 mm，X 形坡口。焊接规范为：电弧电压 25 V，电弧电流 135～150 A，焊速 20～30 cm/min；立焊时，正面第一层、第二层焊缝采用“之”字摆动焊，第三层（盖面焊）采用“弓”字摆动焊，摆幅分别为 4 mm、8 mm 与 14 mm；反面焊时，先清根，第一层采用“之”字摆动焊，第二层（盖面焊）采用“弓”字摆动焊，摆幅分别为 3 mm、与 12 mm；横焊时，正面焊六道焊缝，反面焊四道焊缝，均为不摆动直焊。

② 试验结果　试件由燕山化机厂进行了质量检验。X 光片结果为：横焊缝全部达到 I 级片，立焊缝 2/3 达到 I 级片，1/3 达到 II 级片。力学性能试验的拉伸、侧弯、冲击等试验结果均符合 JB4708—1992 标准要求。

2）现场工艺试验　为了考核与改进球罐焊接机器人的性能，成果样机先后在中石化第十建设公司的球罐焊接工地与试验车间进行了现场焊接试验。试验采用美国林肯公司生产的全位置药芯焊丝。通过对球罐内外纵缝、横缝等全位置焊缝的试焊表明用全位置机器人进行 CO_2 气体保护药芯焊丝自动焊能达到高效、优质，其焊缝成形美观，劳动强度低，是较理想的球罐全自动焊接工艺方法与设备。

（6）全位置球罐智能焊接机器人产品样机

机器人通过产品化开发，实现了模块化制造，主要由柔性磁轮式行走机构、光电实时跟踪系统、焊枪摆动机构及微机智能控制系统四部分组成。机器人的主体结构和样机见图 5.4-8 和图 5.4-9。

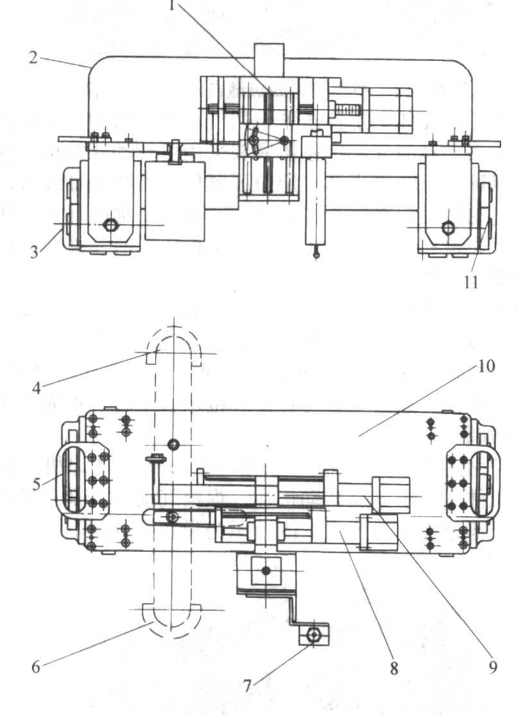


图 5.4-8　BIPT－3 焊接机器人主体（焊车）结构简图

1—高度滑块机构；2—机壳；3—左磁轮箱；4—CCD1 光电传感器；5—把手；6—CCD2 光电传感器；7—焊枪夹；8—摆动机构；9—横向跟踪机构；10—主板；11—右磁轮

1）柔性磁轮式行走机构　柔性磁轮式行走机构包括左右两组磁轮、主板、十字链轴式连接机构与交流伺服电机驱动机构。此机构的各个磁轮在 X、Y 方向上有一定的自由度，能保证各磁轮与球罐表面紧密接触，磁力稳定可靠，在球罐表面的各种空间位置都能稳定爬行，包括前进、后退、拐弯等各种运行方式。焊车速度为 0～80 cm/min。

2）光电实时跟踪系统　CCD 光电轨迹跟踪系统主要由两个 CCD 光电传感器与一个步进电机驱动的横向滑块机构组成，在焊接过程中系统通过 CCD 光电传感器识别在球罐表面的坡口平行线，由滑块带动焊枪左右随动，进行长度方向上的焊缝轨迹跟踪。CCD 传感器的识别精度为 0.03 mm，轨迹跟踪精度设定为 0.5 mm。

3）焊枪摆动机构　焊枪摆动机构主要由一个摆动中心传感器、一个步进电机驱动的滑台机构及焊枪夹持机构组成。滑台的有效行程为 50 mm，焊枪的摆幅设定为 40 mm，摆速设定为 0～200 cm/min。

4）微机智能控制系统　微机智能控制系统主要由 S7－200 型 PLC 微机控制器与各传感器、电机的接口电路组成。系统软件能根据控制盒面板上各旋钮、开关的设定值来综合协调控制上述三个机构的动作，其主要功能有：在多层多道焊接时进行光电实时跟踪，使焊枪摆动中心对准坡口中心；在焊后回车时进行左右实时跟踪，使焊车中心与焊缝坡口中心保持一致；在焊前准备时可调节焊枪的左右、上下位置，调试焊枪在各种摆动方式下的摆幅、摆速、及滞时等参数值。



(a) 产品样机外观照片



(b) 产品样机内部结构照片

图 5.4-9　BIPT－3 型全位置焊接机器人产品样机照片

（7）小结

1）研制的全位置焊接机器人解决了球罐高效焊接的自动跟踪，不用导轨等关键技术问题。

2）采用全位置 CO_2 气体保护药芯焊丝全自动焊，是球罐的高效焊接途径。

3）进一步发展球罐高效自动焊工艺与设备的工作将是研究如何解决单面焊透不清根技术与 CCD 视觉直接跟踪焊缝技术等关键技术，以进一步节省人力、物力与工时。

2.2　汽车后桥壳自动焊设备设计

CJY6421D 汽车后桥壳是全焊接桥壳，它包括桥壳壳体 4 条纵缝、桥壳与桥壳盖和加强环 2 条环缝、桥壳与轴管和法兰 4 条环缝的焊接，根据 CJY6421D 汽车后桥壳生产的工艺技术要求，满足工厂规模化生产条件，将 CJY6421D 汽车后桥壳自动焊接设备按工序划分为：第 1 道工序的焊接设备为



桥壳壳体4条纵缝四焊枪自动焊机；第2道工序的焊接设备为桥壳与桥壳盖和加强环2条环缝双枪自动焊机；第3道工序的焊接设备为桥壳与轴管和法兰定位点定焊接工作台；第4道工序的焊接设备为桥壳与轴管和法兰盖4条环缝双枪自动焊机。整套自动焊接设备全部采用 CO_2 气体保护焊方法。

（1）设计方案

CJY6421D汽车后桥壳是由上下桥壳壳体、桥壳盖、加强环、轴管和法兰5个部分组成。需要完成的焊接缝有上下桥壳壳体组成的4条纵缝；桥壳、桥壳盖和加强环组成的2条环缝；桥壳、轴管和法兰组成的4条环缝。图5.4-10为工件实物图。根据工件的结构特点确立设备的总体设计方案。



图5.4-10　CJY6421D汽车后桥壳总成图

1）上下桥壳壳体组成的4条纵缝采用对工件一次性装夹，使工件垂直固定，4焊枪水平放置并同时横向运动，一次性完成工件4条纵缝的焊接。该设计结构焊缝成形较稳定。但在自动焊接情况下，只要焊接参数调节好且稳定，能保证实现单面焊双面成形（见图5.4-11）。

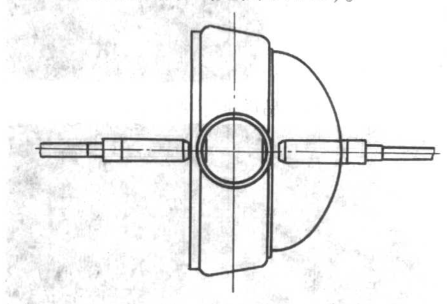


图5.4-11　焊枪水平位置焊示意图

2）桥壳壳体、桥壳盖、加强环焊缝。采用工件一次性装夹，工件转动，焊枪固定，一次完成2条焊缝的焊接（见图5.4-12）的设计方案。此方案焊缝成形好、稳定且容易控制，焊接生产效率高。

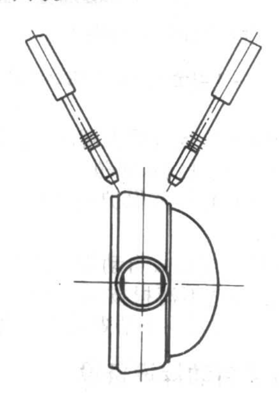


图5.4-12　双枪环缝焊示意图

3）桥壳壳体与轴管和法兰定位点定焊接是为下1道工序——桥壳壳体与轴管和法兰4条环缝的自动焊接而设计的。

桥壳壳体与轴管和法兰4条环缝采用在1台设备上双枪2次完成。这样一方面可以节省1台设备；另一方面，采用工件转动、焊枪固定的焊接方式，使编写程序很容易实现，通过焊枪位置的移动和工件转动速度的变化，完成工件不同位置的自动焊接（见图5.4-13），并可以节省1次下料上料工序。

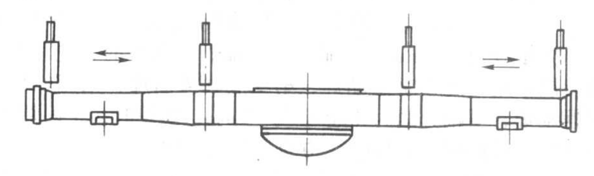


图5.4-13　双枪四环缝焊示意图

（2）机械结构特点

1）上下桥壳壳体四纵缝自动焊机的机械结构由3个部分组成：导轨床身、送丝机支架和防护滑动门；滚轮托架、上下桥壳轴向定位压紧机构、上下桥壳压紧机构、桥壳盖定位压紧机构、加强环定位压紧机构、桥壳壳体中心压紧机构；焊枪行走和调节机构。图5.4-14所示为设备外观图。

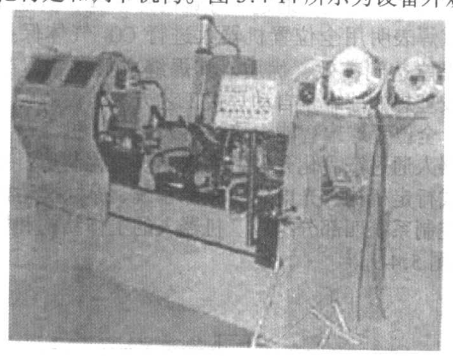


图5.4-14　桥壳壳体四纵缝自动焊机外观图

上下桥壳壳体的定位压紧采用气动连杆机构，滚轮托架和滚轮压头，轴向气动定位压紧头采用可转动式结构，这种结构可保证上下桥壳壳体在定位压紧后，沿桥壳轴线可以实现有一定的转动，在桥壳盖定位压紧机构、加强环定位压紧机构将桥壳盖和加强环与桥壳壳体定位压紧时，能保证桥壳壳体与床身导轨垂直。

焊枪行走机构采用4组二维电动拖板，一维方向保证焊枪沿工件接缝行走，另一维方向保证焊枪与工件焊接缝的距离。电动拖板采用直线滚动导轨副导向，滚珠丝杠副传动，步进电机驱动，这种结构可保证焊枪运行平稳、可靠和实现焊缝的跟踪。

2）桥壳壳体和桥壳盖、加强环两环缝自动焊机的机械结构由工件定位压紧及转动机构、焊枪气动升降及三维调节机构2个部分组成。图5.4-15所示为设备外观图。

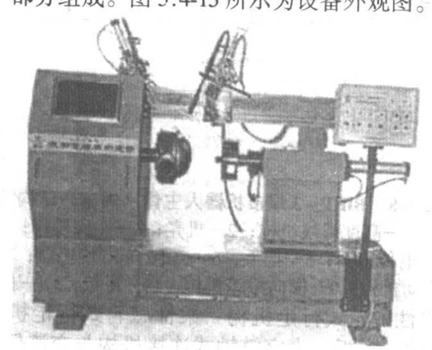


图5.4-15　桥壳壳体和桥壳盖、加强环两环缝自动焊机外观图

转动机构是步进电机驱动蜗轮蜗杆减速的主轴箱，它带动主轴上的夹具使工件转动，气动回转头压紧工件。该结构的主轴转动角度可以预先精确设定。在主轴箱和气动回转头



上分别设置 1 套集电环装置，并接到各自的焊接电源，保证焊接过程的稳定。

焊枪采用气动升降、滑动拖板导向使焊枪动作快捷、可靠、重复性好并且结构简单。

3）桥壳壳体和轴管、法兰四环缝自动焊机的机械结构由 3 部分组成：转动及定位机构、工件气动托架机构、焊枪行走及升降机构。图 5.4-16 所示为定点焊接工作台设备外观图，图 5.4-17 所示为自动焊接设备外观图。

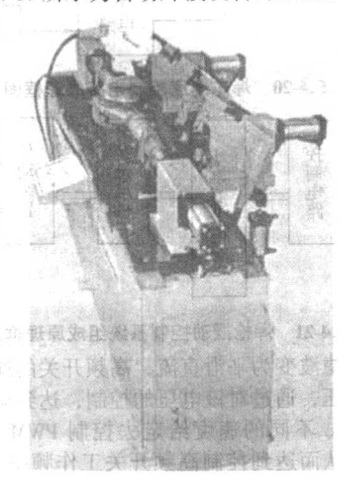


图 5.4-16　定点焊接工作台外观图

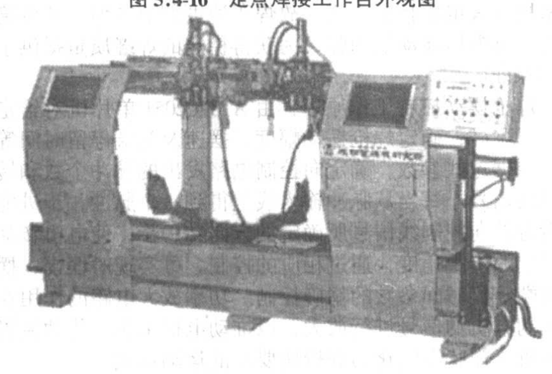


图 5.4-17　桥壳壳体和轴管、法兰四环缝自动焊机外观图

焊枪行走机构采用流行的矩形梁导轨结构，九轴承式滚动拖板，滚珠丝杠副传动，直流伺服电机驱动。焊枪升降机构采用双导杆导向、滑块镶直线轴承，丝杠传动，步进电机驱动。该结构定位精度高、运行平稳，可满足工件不同位置焊接的需要。

（3）电气控制系统

1）系统硬件组成及工作原理

① 自动焊设备的控制系统均由单片机系统、位置检测机构（包括接近开关和磁性开关）、执行机构（包括步进电机、直流伺服电机及电磁气阀）、I/O 通用接口等几个部分组成，系统框图如图 5.4-18 所示。

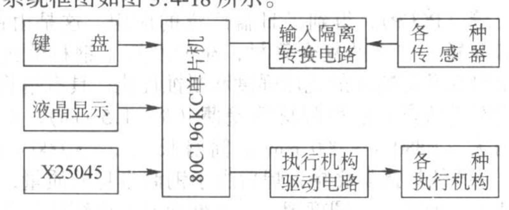


图 5.4-18　控制系统框图

本系统采用的是 80C196KC 单片机，由于系统在运行过程中可以对焊接速度、焊接长度、收弧时间等参数进行预先设置，在控制柜面板上装配了 12864 点阵的液晶显示屏，液晶显示屏显示中文菜单，滚动翻屏，非常直观地显示设备系统所需设置的焊接参数和位置参数。为了防止在焊接过程中突然断电，系统采用串行 X25045EPROM 实现掉电保存数据功能。

② 焊接电流和焊接电压设定方法是：将原焊接电源上由指针式电流、电压表显示的焊接电流、焊接电压通过隔离转换处理后输入 CPU，隔离转换电路采用 LM331 分别进行 V/F 和 F/V 转换。

③ 上下桥壳壳体纵缝自动焊机因工艺要求焊枪行走不同轨迹，其焊枪行走机构上采用了 4 套二维电动拖板机构。这 4 套二维电动拖板机构采用 8 台意大利生产的 NH2003426 混合式步进电机驱动，配以步进电机细分驱动器 SH－20503、SH－20504。其他几种自动焊机采用保持转矩更大的 NH2003438 混合式步进电机和程序可控制细分的 SH－20503 混合式步进电机驱动器来驱动工件。

④ 整套设备采用气缸式工装夹具，采用磁性开关方式检测气缸动作到位信号，用接近开关检测焊枪动作到位信号，以便实现动作的程序控制和动作顺序的程序锁定，以防操作人员误操作带来的人身伤害和设备损坏。在对开关量处理时，均采用了光电隔离，增强系统的抗干扰能力。整个系统采用开关电源供电，在电路板电源入口处并接电解电容和独石电容，以消除电源脉动的影响。

2）软件设计　系统软件采用模块化设计，各模块均采用子程序的形式实现。主要有液晶显示、数据掉电保存、焊接电流及焊接电压的采集处理、键盘扫描、焊枪行走或工件转动以及各开关量的检测。系统主程序主要实现键盘扫描以及焊接电流、电压的采集显示功能，结构非常简单。

① 焊接电流、电压的采集显示。由于采样值与实际显示值之间呈非线性，因此，在数据处理时采取了分段线性拟合，使得显示值与指针表的值相一致。

② 开关信号处理

（a）①磁性开关的到位处理　先检测其状态，若为到位状态，则延时 10 ms 后再检测其状态，若仍然为到位状态，则认为该磁性开关为到位，否则被视为干扰。

（b）接近开关的到位处理采用两种方式　一种是在后桥桥壳壳体四纵缝自动焊机上，由于其接近开关是用来定位步进电机的，而步进电机的驱动需要占用 CPU 资源，采用延时的方法会引起步进电机的丢步，所以此处采用计数的方法，即认为检测其状态在第 1 次和第 100 次均有效，则认为有效；另一种是在后桥桥壳壳体、轴管、法兰四环缝自动焊机上，其接近开关是用来确定伺服电机的位置的，而伺服电机一旦启动就不占用 CPU 资源，因此，可以采用延时的方法来消除干扰。

③ 后桥桥壳壳体四纵缝自动焊机的 4 把焊枪需要同时动作，其速度、所走的长度均不一致，因此要求程序同时控制 8 台步进电机，由于每工位 X 轴与 Y 轴步进电机的行走具有相关性，可以利用 80C196KC 单片机的 4 个软件定时器来实现对 8 台步进电机的控制。由于工艺要求，焊接时当步进电机走完焊接长度时，应及时收弧，而 4 个工位的焊枪由于速度、长度的不一致，不可能让 4 个工位同时收弧，因此，要求每个定时器需完成该工位焊枪从原位到零位的行走、焊接轨迹的行走和收弧。

（4）小结

该套焊接设备以其独特的焊接方式、灵活可调的结构形式、完整的成套性、统一的控制系统模式，在生产效率方面完全满足 CJY6421D 汽车后桥壳的焊接生产要求；在焊接质量方面符合三菱汽车公司对同类产品的焊接质量要求。另外，经过对夹具的改进，还满足其他轻型车和越野车后桥壳的焊接生产要求。



2.3 全位置自动焊机构设计

(1) 机构技术要求和工作原理

该机构进行全位置自动焊时，依靠柔性导轨上磁铁的吸力，将导轨吸附在待焊工件上，然后将移动机构装在柔性导轨上，驱动电机经减速带动直齿轮转动，直齿轮与柔性导轨上的齿条相啮合，从而使移动机构在导轨上移动，移动速度即为焊接速度。焊枪摆动机构则装在移动机构上，可实现焊枪摆动控制。摆幅、摆速和两端停留时间能调节，可以适应多种焊接工艺的要求。

(2) 机构的组成和结构特点

该机构的结构如图5.4-19所示，其特点如下。

1) 主体采用铝合金材料，具有质量轻，移动方便等特点，适宜于多种现场施工。

2) 所采用的电机体积小、功率大，电磁性能好，能充分满足机构焊接空间曲线焊缝对驱动力的要求。

3) 柔性导轨能较好地弯成多种空间曲面形状，稀土材料制成的磁铁具有足够的吸力，可确保机构的使用要求。

4) 焊接速度可实现无级调节，且速度稳定，调节方便，易操作和维护。

焊枪摆动速度、摆动幅度及两端停留时间可预置和调节，配合小车运动状态可实现多种轨迹的摆动要求，满足不同焊接工艺要求，且焊枪角度可调节。

(3) 焊车移动减速系统、焊枪摆动系统、柔性导轨和磁铁

1) 焊车移动减速系统 电机经减速系统减速后，由传动机构带动直齿轮转动，该直齿轮与柔性轨道上的齿条相啮合，带动焊车运动，实现自动焊接。通过调速系统控制电机转速，可调节焊接速度，满足不同焊接工艺的要求。

2) 焊枪摆动系统电机由传动机构带动焊枪运动，焊枪角度可以调节。通过控制步进电机的状态，实现焊枪摆幅、摆速及两端停留时间等状态参数的调节、控制。

3) 柔性导轨的软硬程度以及抗热性、耐挠屈性等性能，直接关系着机构的使用性能和范围。根据机构的使用场合，柔性导轨采用软钢材料制成，导轨上安装有齿条和磁铁等附件。齿条采用聚四氟乙烯或尼龙加工而成。导轨两端头都设有连接装置以加长导轨，便于长焊缝的焊接。

4) 磁铁 机构在空间作业时，磁铁底面与焊接件间会出现局部的线接触或点接触，这就要求磁铁有足够的吸力。采用稀土永磁材料（铷铁硼永磁铁），吸力可达1 176 N以上，其吸力性能达到国外同类设备水平。

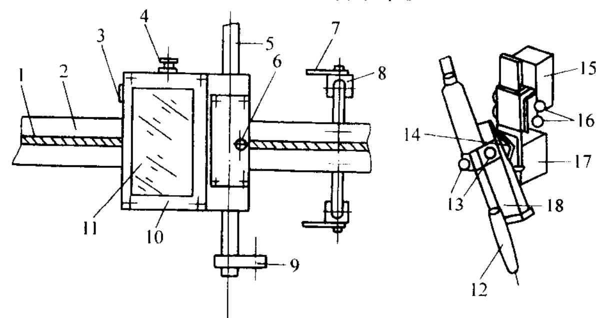


图5.4-19 机构的结构简图

1—齿条；2—柔性导轨；3—控制缆；4—离合器；5—移动导杆；6—手轮；7—扳手；8—磁铁；9—夹持装置；10—主控箱；11—操作面板；12—焊枪；13—锁紧螺钉；14—转动装置；15—连杆；16—手轮；17—传动装置；18—摆杆

(4) 电气控制系统原理

焊接小车速度控制电路原理如图5.4-20所示，焊枪摆动控制系统组成原理如图5.4-21所示。

焊车速度控制工作原理：输入交流电经整流后，变成脉

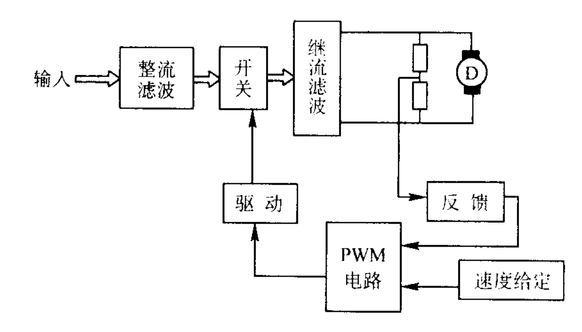


图5.4-20 焊车速度控制电路原理框图

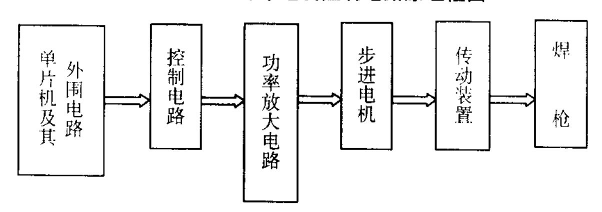


图5.4-21 焊枪摆动控制系统组成原理框图

动直流，再经滤波变为平滑直流，高频开关的通断控制直流电机两端的电压，通过对该电压的控制，达到调节速度和稳定速度的目的。不同的速度给定去控制PWM（脉宽调节）电路的输出，从而达到控制高频开关工作频率大小的目的。采用电枢电压负反馈可进一步提高速度稳定性。由于速度控制采用开关电源控制方式，故焊车速度调节方便，速度稳定性高，抗电压波动能力强，为获得稳定的焊缝质量提供了可靠的保证。

焊枪摆动控制工作原理：由AT89C2051单片机对给定信号进行采样，确定焊枪摆动幅度、摆速及两端停留时间等参数。根据这些参数，确定向控制电路发出的脉冲个数和转向控制线信号。每当从脉冲输入线上得到一个脉冲，步进电机便沿着转向控制线信号所确定的方向转一步，使电机转动一个固定的步距角度，通过相应的控制，可实现对摆幅、摆速和两端停留时间参数的精确控制。功率放大电路的作用在于对控制电机的信号进行放大，以推动电机工作。传动装置则将电机工作状态转化为焊枪所要求的运动形式。

该控制系统采用触摸方式输入给定参数，且输入的给定参数由数码管显示，具有直观、醒目、操作简便等特点。

(5) 焊接试验

采用所设计、制作的机构和NBC－400型CO_2气体保护焊机，在焊丝$d=1.2$ mm，电流120 A，电压21 V的情况下，进行了平、横、立等焊接位置的大量焊接工艺试验。结果表明，焊接过程稳定，焊缝成形好，机构的各个参数调节方便灵活，完全可以满足焊接工艺对机构性能提出的指标要求。

3 自动焊接设备的改造设计实例

3.1 大直径钢薄壁长筒体自动焊装置设计

随着国民经济的发展，一种新型的管材——预应力钢筒混凝土管（PCCP），得到了日益广泛的应用，这是由钢板、钢丝和混凝土构成的复合管材，充分发挥了钢材的抗拉强度、密封性及混凝土的抗压强度和耐蚀性能，具有钢管和水泥管的双重特点。这种管材筒壁薄（$\delta=1.5$ mm），直径变化范围大（$\phi880\sim3\ 000$ mm），筒身长（$L=5\ 000\sim6\ 000$ mm），纵缝的焊接易烧穿，焊后由于钢筒自身的质量，使筒体刚性差，变形大，圆度超差，虽然两端采取缩口的方法可以在其两端装上法兰盘，但是收口工序非常困难，不仅劳动强度大、生产周期长、效率低、成本高，而且焊接质量难以保持稳定。为解决上述问题，研制大直径薄壁长筒体纵环缝



自动焊接装置。

(1) 自动焊接装置的结构及工作原理

一般的筒体刚性较大，筒体放在滚轮架上，由焊接操作机带动焊枪移动可以完成纵缝自动焊接，由滚轮架带动工件转动，容易实现筒体环缝的自动焊接。而对于大直径薄壁长筒体的纵缝及两端法兰盘环缝的自动焊接，用常规的生产方法就很困难，为了实现这类焊缝的自动焊接，设计的自动焊机的焊接装置必须具有撑圆定位机构，然后需将筒体连同两端的法兰盘套在撑圆定位机构上（见图5.4-22），保持筒体与法兰盘的正确安装位置，再用活动支承使撑圆定位机构处于水平状态，最后才能按正常的普通厚壁筒体与法兰盘的焊接工艺进行焊接。

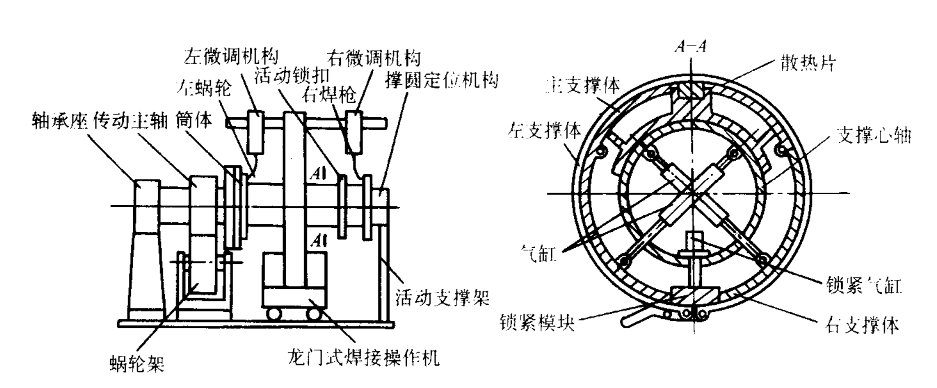


图5.4-22 超薄壁长筒体自动焊接装置的结构和工作原理示意图

1) 撑圆定位机构 主支撑体固定在支撑心轴上，左、右支撑体的一端通过铰链分别安装在主支撑体的两侧，大气缸的两端通过铰支撑分别固定在支撑心轴和左、右支撑体上，调节大气缸的行程，可改变撑圆定位机构的外径尺寸，实现对筒体的撑胀定位和卸下工件，调节锁紧气缸，可使锁紧楔块对左、右支撑体实现定位、自锁和解锁。

2) 筒体与法兰盘的定位安装 撑圆定位机构固定在由轴承座和滚轮架支持的传动主轴上。筒体与左、右法兰盘安装的轴向尺寸，由撑圆定位机构定位。当滚轮架转动时，可通过传动主轴带动撑圆定位机构转动，从而带动工件转动。活动锁扣套在筒体上，通过大气缸撑胀筒体内径，可使筒体与法兰、活动锁扣贴紧，满足筒体的径向装配要求。活动锁扣可限制筒体的最大径向尺寸，它在筒体上间隔排列，便于焊前点固纵焊缝。锁紧气缸通过锁紧楔块迫使左支撑体和右支撑体在焊接过程中保持筒体直径不变。更换固定在支撑心轴上的左支撑体、右支撑体及主支撑体，可焊接不同直径的筒体。

3) 焊前初始位置的确定 左、右微调机构可在龙门式焊接操作机横臂的两端左右移动，在其上面分别安装左焊枪和右焊枪。焊接操作机可沿导轨左右移动，以便进行焊枪纵缝起始位置的粗调。左、右微调机构在操作机械臂上的移动，可使焊枪进行两瑞环缝初始位置的粗调。左、右微调机构自身的三维运动，可用来调节焊枪与焊缝在焊前的初始位置。

4) 焊接速度的控制 控制龙门式焊接操作机沿其底部导轨左右方向移动的速度和焊接滚轮架的回转速度，可分别实现对筒体纵缝与两端环缝焊接速度的调整。

5) 焊枪送进机构 左、右焊枪送进电机和焊枪送进机构通过左、右微调机构可直接对左、右焊枪实现焊枪的快速送进和回拖复位。

6) 动作程序 调整滚轮架的正、反回转方向，使散热片在水平位置上，将法兰盘与筒体的组件套在撑圆定位机构上，并使接缝处在最上方，装上活动锁扣，先使大气缸撑胀筒体，接着锁紧气缸向下运动，使锁紧楔块向外撑胀左、右支撑体，并实现自锁，然后点固纵焊缝和环焊缝，卸下活动锁扣，装上活动支承架，最后启动焊枪电机，通过焊枪送进机构把右焊枪送进到纵缝起始焊接位置上引弧，龙门式焊接操作机沿底部导轨向左移动，从而带动横臂上的右焊枪按调好的焊接参数焊接纵缝，当右焊枪焊完纵焊缝以后熄弧，龙门式焊接操作机再向右移动复位；左、右焊枪送进机构分别送焊枪到两端环缝位置上引孤，焊接滚轮架转动，左、右焊枪分别按调好的焊接参数，同时焊接筒体两端的环缝。环缝焊完后熄弧，左、右焊枪回拖复位，一个筒体焊接过程结束。

(2) 焊接装置的主要设计特点

1) 该自动焊接装置利用左、右支撑体的位置变化，可改变撑圆定位机构的直径大小，实现撑胀、定位。只要改变左、右支撑体和主支撑体的外径尺寸，就可实现不同直径筒体的自动焊接。

2) 该焊接装置在撑圆定位机构的右端（长为5 000 mm)，装有活动支承，解决了悬臂自重引起的变形，保证了焊接过程焊接弧长不变，又为装卸工件提供了方便。

3) 该焊接装置的锁紧气缸，利用了锁紧楔块与左、右支撑体的摩擦力，在无气压的情况下，也可保证撑紧后，楔块在左、右支撑体内实现自锁，克服了气缸漏气、压力下降撑不紧的缺点。在主支撑体上固定的散热片，防止烧穿、保证了焊接质量。

4) 该焊接装置所有的焊枪位置都靠行程开关来保证，不但调整方便，运动位置准确，而且避免了传动误差积累，提高了焊枪运动重现性的精度。对纵缝和环缝的焊接，从装配、撑胀筒体、锁紧、纵缝焊接、复位。环缝焊接、熄弧、焊接结束，实现了整个过程自动化。缩短了生产周期，保证了焊接质量，提高了生产效率，并设计了手动和自动两套控制线路，为试焊单件小批生产简化了调试手续，又为大批量生产提高了效率。

(3) 工艺试验结果

该焊接装置研制成功之后，通过对壁厚 $\delta = 1.5$ mm，直径 $D = 1\ 400$ mm，筒体长 $L = 5\ 000$ mm 的筒体焊接，取得了良好的效果，比手工焊接提高效率5～8倍。焊接质量稳定可靠。完全消除了强行装配的噪声。焊接工艺试验结果表明：焊缝成形良好、表面光滑均匀、水压和密封试验、力学性能等各项技术指标全部满足产品技术要求。

3.2 抽油机驴头圆弧焊专机设计

常规型游梁式抽油机是目前国内外广泛应用的机型，它一般由驴头、游梁、连杆、曲柄、减速器、支架与底座等组成。但驴头结构件的圆弧形主焊缝不能直接使用焊接小车来实现焊接自动化。因此需要研制抽油机驴头圆弧埋弧自动焊

专机，以提高焊接生产效率和焊接质量，降低成本和工人的劳动强度，改善劳动环境。

(1) 抽油机驴头圆弧焊缝焊接专机工作原理

专机主要由 ZXG－1000R 弧焊整流器，经改造的 MZ－1－1000A焊接小车，焊接平台及工装等组成。

驴头是把游梁的摆动变成悬点往复直线运动的装置，是一个用来转换运动形式，并且以中央轴承旋转中心为圆心的圆弧件。可以采用"圆规画圆"的原理，实现机头焊丝对圆弧焊缝的跟踪与焊接（见图 5.4-23）

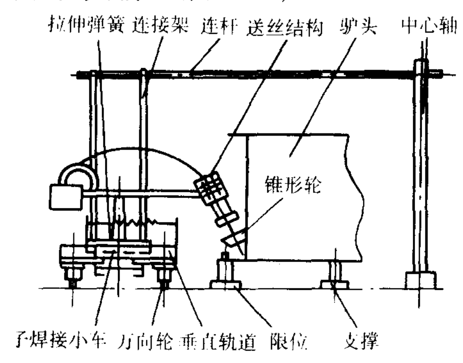


图 5.4-23 驴头埋弧自动焊专机示意图

(2) 专机结构特点

1) 用一根连杆和一个连接架将焊接小车与焊接平台上处于驴头圆弧中心的中心轴连接起来，然后通过一组位于驴头侧板圆弧线处的限位，对驴头摆放位置进行限位，从而实现焊接小车机头焊丝对圆弧焊缝的粗略跟踪。由于原装焊接小车主动轮、从动轮轴线相互平行，使小车转向阻力很大，并且产生振动，以及工装装配间隙误差和驴头圆弧板组合半径方向偏差的存在，使得单一的连杆牵引导向系统跟踪焊缝的准确性受到很大影响。为能实现机头焊丝对焊缝的准确跟踪，对焊接小车结构进行改造，采用如图 5.4-24 所示的结构。

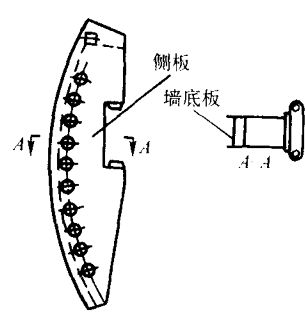


图 5.4-24 驴头结构示意图

2) 将原小车两侧从动轮换成万向轮，即将原小车两侧从动轮轴拆除，利用该处螺纹孔固定两个"⌐"形支撑架，用以安装固定万向轮。这样使焊接小车在连杆的牵引下能够灵活地转向，大大减小了转向阻力和振动，增强了焊接小车的运行平稳性。

3) 采用管式导电嘴，并在导电杆上加了一个绝缘锥形导向轮，以保证机头在运行中与驴头弧形槽底板相贴合，以实现圆弧的形状跟踪。

4) 小车主体结构改造。首先将焊接小车支架（包括滑块、T形梁）拆下后，在原小车底盘大梁上加一条与其垂直轨道，然后另做一套底盘与拆下的支架滑块连接组成不带动力"子焊接小车"。将"子焊接小车"装入轨道，并用拉伸弹簧将"子焊接小车"与轨道连接起来。小车行走机构和送丝机构位置保持不变。

这样由连杆、垂直轨道、拉伸弹簧、锥型导向轮等就构成了一个简单的机械式自动跟踪系统，使得焊接小车机头既可以做受连杆限制的圆弧运动、又可做沿圆弧半径方向的运动，从而可以实现对圆弧焊缝的准确跟踪。

(3) 驴头圆弧焊缝的焊接工艺及参数

由于驴头结构件太大不易翻转，不可能使焊缝置于船形位置，所以驴头的两条圆弧焊缝采用水平角焊。其优点是除不需要翻动工件外，对间隙（组合）大小不敏感，即使间隙过大，也不至于产生熔渣或熔池金属流溢现象。其缺点是单道焊焊脚最大不能超过 8 mm，所以当需要焊脚大于 8 mm 时，只能使用多道焊，否则焊缝成形不易控制。但是由于自动焊电流大，熔深大，所以与手工焊相比，焊脚长度可以适当降低。另外，焊缝成形与焊丝对工件的相对位置有很大关系，当焊丝位置不当时，易产生咬边或腹板未熔合。为获得较理想的焊缝形状，应特别注意以下几方面。

1) 焊丝偏于腹板，焊丝与腹板的夹角 α 应保持在 15°～45°范围内（一般为 20°～30°）。

2) 采用直流电源 450～750 A（反接）且电流不宜过大，电弧电压也不宜太高（28～36 V），这样可使熔渣减少，防止熔渣流溢。

3) 使用细焊丝可减少熔池体积，以防止熔池金属的流溢，并能保证电弧燃烧稳定，可采用 ϕ3.2 mm、ϕ4 mm 的焊丝。

4) 采用 MnO 含量较低、密度较小的焊剂。采用密度大的焊剂（如 HJ431）焊缝成形很差，甚至熔合不良。通过焊接实验及工艺评定，采用 H08MnA/H10MnA 焊丝与 SJ301 焊剂配合，焊接 Q235 材料得到了较好效果。

3.3 罐体新型探臂焊车研制

目前乙炔钢瓶、丙烯钢瓶、煤气钢瓶、汽车空压机储气筒等压力容器的内外纵缝均采用探臂式自动焊车进行焊接。其特点是设备投入成本低，操作使用方便。由于这些工件直径较小，一般在 300～800 mm 左右，长度较短，一般在 500～2 000 mm 左右，普通埋弧焊车及导轨由于外形尺寸的限制不可能进入罐体内部，只能在工件外部架设导轨，焊车在外导轨上行走，探臂伸入工件内部进行焊接。现在国内用户使用的探臂焊车均用普通埋弧焊车加装探臂改制而成。由于原焊车的结构局限，很难保证探臂装配强度及力的平衡。探臂长度探出超过 1 m，在焊接过程中探臂就会出现上下左右的抖动，造成焊缝质量不稳定。为了解决这个问题，如图 5.4-25 所示的改造后的新型探臂式自动焊车。

(1) 改造要点

1) 为增强焊车的稳定性，加大焊车底盘的质量。与普通焊车相比质量增加了 50%。

2) 降低探臂至焊车导轨的高度。原探臂距导轨高度约 500 mm，现为 250 mm。

3) 送丝机构及焊丝盘安装在焊车后部，焊剂斗与控制箱的重心都在焊车内，探臂与探臂支撑的重心、电缆线与接头的重心也都在焊车内，有效地改善了探臂与焊车的重力平衡。

4) 解决罐内埋弧焊接时焊剂的自动铺洒问题。既可在焊接前铺洒，也可与焊接同步铺洒。

(2) 探臂式焊车的结构及功能

1) 焊车行走机构　采用新型后轮驱动方式，由 JSI 微型减速电机驱动二联齿轮。用拨叉拨动减速轴上的滑动二联齿轮，可获得两种输出转速，焊接速度可达 125 m/min。

2) 探臂机构　由刚性外套钢管、导电用铜内套管、钢丝绕制的 3 层芯管、绝缘套及两件外套管支架支撑组成。根据用户焊接需要更换芯管，可输送 ϕ3 mm、ϕ4 mm、ϕ5 mm 焊丝。探臂正常工作长度为 500～2 500 mm。



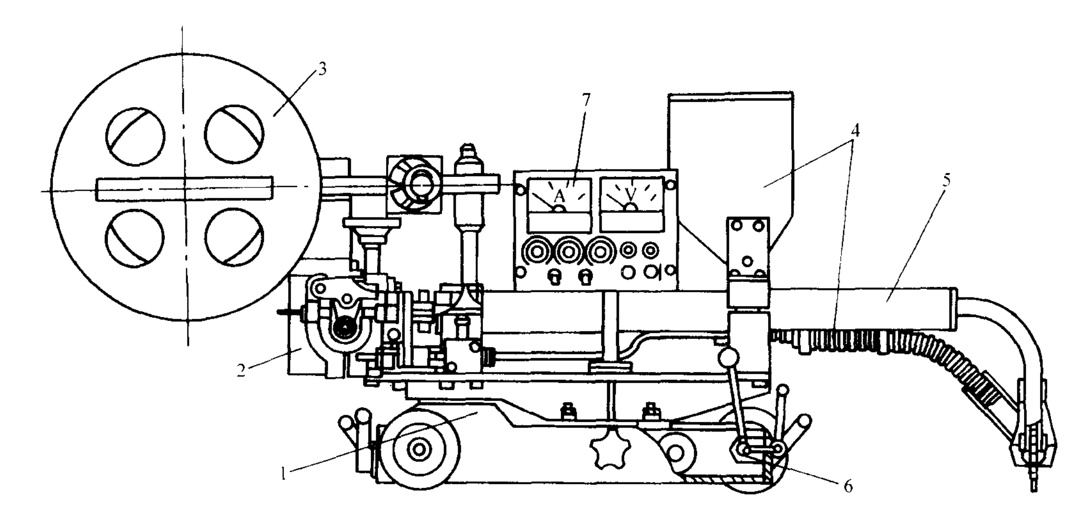


图 5.4-25 探臂式自动焊车结构图

1—焊车行走机构；2—送丝机构；3—焊丝盘机构；4—焊剂自动供给系统；5—探臂机构；6—探臂垂直调节机构；7—焊车控制箱

3）探臂垂直调节机构 将只有支撑功的前轮轴改为偏心轴，在轴上装有调节手柄，扳动手柄改变前轴的偏心度使焊车前端具有高度的变化。使探臂（焊炬）升高或降低，调节量为80 mm，基本满足焊接时干伸长度调节的需要（此调节量与探臂长度有关）。调节后用锁紧手柄固定。此机构新颖、结构紧凑、调节方便快捷。

4）焊车操纵控制箱 用于焊车与各类电源的连接和控制，箱上装有焊接电流、焊接电压显示；焊车前行后行、停止开关；点动送丝、退丝按钮；焊接启动、停止按钮；焊接电流，焊接电压、焊接速度调节电位器，满足了焊车及焊接运行中参数调节及控制的需要。送丝机构：在使用 $\phi3$ mm、$\phi4$ mm、$\phi5$ mm 焊丝时，可装配由调速电机驱动的齿轮蜗轮减速箱，单驱双主动送丝，增大送丝力。在使用 $\phi3$ mm 以下焊丝时可装配印刷电机送丝装置。

5）焊丝盘机构 可装配内绕式焊丝盘，也可装配精排外绕式焊丝盘，根据焊丝直径由用户选用。

6）焊剂供给系统 由压缩空气开关、节流阀、气管、焊剂斗、焊剂输送管、密封式漏斗组成。使用前将焊剂斗装满焊剂，打开压缩空气开关，检查漏斗焊剂供给量大小，调整节流阀，使焊剂供给量满足使用要求，关闭压缩空气开关，使用时打开开关即可。应根据消耗情况随时向焊剂斗添加焊剂，保证焊接过程中焊剂正常新型探臂式焊车与薄板冲压式焊车导轨、刚性铜垫板与气动压紧机构及气动托紧焊剂垫配套使用，成为罐体内外纵缝焊接质量的重要保证。经过大量的工艺试验及用户批量焊接生产、焊缝外观及内部缺陷明显减少、一次合格率明显提高，且焊接质量稳定，达到了预期的设计效果。

4 自动焊设备微机控制系统设计实例

4.1 弧焊设备通用一元化调节微机系统设计

图 5.4-26 所示为单片机一元化调节系统的组成框图。

（1）系统的一元化调节原理

此微机控制系统采用新型的电改写存储芯片 EEPROM 来记录最佳规范参数组合。对某种具体焊接工作，根据其焊接条件（焊丝直径、材质、坡口形式及尺寸等），先用实验法由 EEPROM 存储器记录最佳焊接参数的若干组配置，单片机控制系统对记录下来的这些离散点，用内部监控程序将其平滑成连续的最优参数曲线。在实际焊接时，操作者按需要的焊接电流值调节控制面板上的单旋钮，单片机系统按此旋钮调节值的 A/D 转换量自动对最佳参数曲线进行插补运算，所得结果再经线性光耦电路控制焊接电源外特性与送丝机构。这样就实现了对焊接电弧电压与电流参数的一元化调节。

在最佳参数工艺时试验，记录的点越多，所建立的最佳曲线就越准确，微机一元化调节参数的效果也就越好。实验表明，一片 2K 的 EEPROM 可记录八条最佳参数曲线的数值。

（2）系统设计要点

1）系统硬件设计要点

① 以 8031 单片作为主处理微处理器，EEPROM 为外部存储器，单片机输出信号接口电路经光耦电路后连接到焊机的电压（外特性）和送丝机调节电路。这样，微机系统具有通用性，可与各种类型的焊接电源与送丝机构相连。

② 采用对称反馈式光耦放大器来实现输入，输出信号的线性光电隔离。

2）控制程序设计要点

① 采用模块化程序结构，以便于接口和调试，如图 5.4- 27 示。

② 采用中断响应进行实时监控。

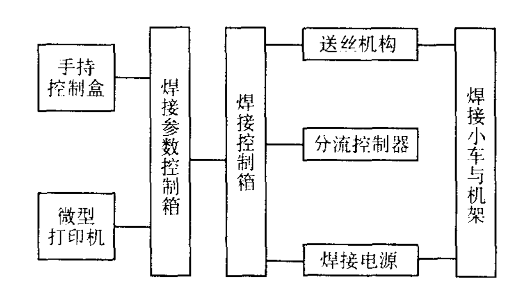


图 5.4-26 一元化调节焊接系统组成框图

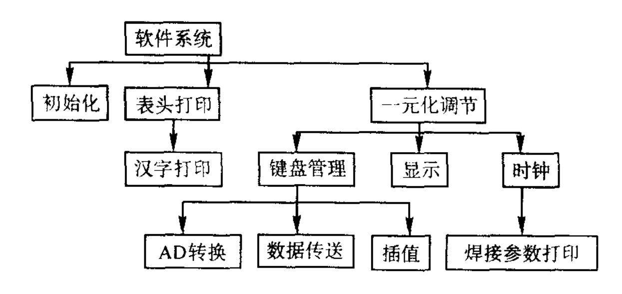


图 5.4-27 一元化调节程序结构图



③ 插值模块中采用了最简单的线性插值算法，即 $Y_2 = Y_0 + [(X_2 - X_0)/(X_1 - X_0)] \times (Y_1 - Y_0)$

④ 采取以8次采样值的平均值作为正式参样值，再进行数字滤波，以尽量减小采样误差。

⑤ 设置一些冗余和软件陷阱，在干扰引起程序弹飞现象时，使CPU重新返回程序起点，恢复正常监控。

4.2 翅片管自动焊机微机控制系统设计

(1) 设计要求

根据绕转速 n_1 控制压片机的速度 n_2，使压片机的压片线速度 v_2 在焊接翅片管过程中与绕片机转速决定的翅片绕制与焊接速度保持一致，如图5.4-28所示。

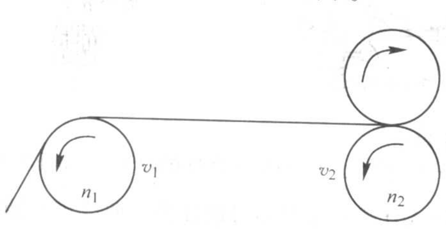


图5.4-28 翅片管自动焊接设备的示意图

图中，n_1 为绕片机主轴转速，r/min；n_2 为压片机滚轮转速，r/min；v_1 为绕片机上翅片线速度，mm/min；v_2 为压片机上翅片线速度，mm/min。

显然，$v_1 = \pi D n_1$

式中，D 为翅片管外径。

则此设计要求实质是，当 n_1 根据工艺选定后，使控制系统按 v_1 值调节 v_2 值，使 v_2 与 v_1 保持一致。

(2) 调速系统技术指标

有关压片机调速的主要技术指标如下。

1) v_2 速度范围 300～1 000 mm/min

2) v_2 控制精度 ±1%

按最大值 $\Delta v_2 = \pm 1\% \times 1\,000 = \pm 10$ mm/min

3) 调速响应时间 <4 s

4) 操作方式

① 可手动/自动控制 v_2

② 人工设定 v_1 值（绕片机转速为有级选择，翅片管直径根据实际工作）

③ 有显示速度设定值、实际值功能。

(3) 翅片管自动焊接设备

翅片管自动焊接设备见图5.4-29。

其特点如下。

1) 功率大，4.5 kW电机。

2) 场地大，遥控。

3) 工作程序复杂，自动顺序控制。

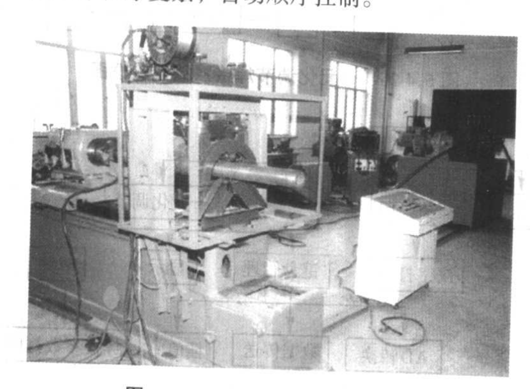


图5.4-29 翅片管自动焊接设备

(4) 设计方案

1) 系统总体设计方案　本实例采用微机调速系统对压片机电机进行闭环速度控制。其总体思路如图5.4-30所示。

闭环控制系统主要由微机系统、光码电路、继电电路、控制电机及键盘、显示器组成。其工作原理是光码电路将压片机主轴转换成电脉冲信号，输出给微机系统。微机系统根据检测速度的结果对继电电路发出通断信号，由控制电机改变调整电机星形轮位置而进行无级调整，直至 $v_1 = v_2$。下面主要对光码盘电路、继电控制电路功能进行分析。

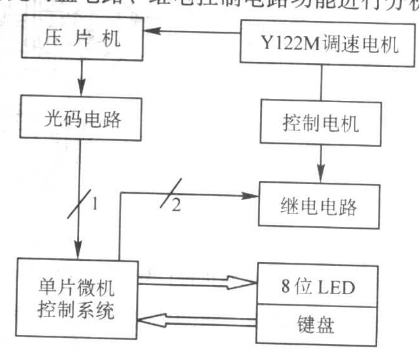


图5.4-30 闭环控制系统方框图

2) 光码盘电路功能

① 传感器　ZXB－8型360形光码盘，电源电压+5 V，每转输出360个TTL电平，可直接连8031的T0引脚进行计数测速。转速又是2倍的关系，从而使测量精度增加。

② 测量精度

a) 按设计技术指标，速度控制精度在±10 mm/min则测量精度应小于±10 mm/min，即每1个光码电路输出脉冲相应的速度应小于±10 mm/min

b) 由于压片机辊轮直径大（140 mm），当 $v_2 = 300 \sim 1\,000$ mm/min时，对应的转速为 $n_2 = v_2/\pi D = 0.68 \sim 2.27$ r/min，此外，控制系统的控制响应时间应<4 s，若取采样周期为3 s，则 $v_2 = 300$ mm/min时的光码脉冲计数值 $N = n_2 \times 3 \times 360/60 = 0.68 \times 18 = 12.24$ 个，单位脉冲分辨率 $= 300/12 = 25$ mm/min > 10 mm/min，所以测量精度不符合要求。

c) 提高测量精度措施：光码盘通过传动比为8.845:1的皮带轮与压片机输入轴相连，输入轴与压片辊轮的转速比为2:1，这样光码盘的转速 n 为 $= 8.845 \times 2 \times n_2$ ——比 n_2 提高17.7倍，当 $v_2 = 300$ mm/min时 $n_2 = 0.68$ r/min，而 $n = 8.845 \times 0.68 = 12.03$ r/min，相应的光码脉冲计数值 N（3 s）为 L：$N = n \times 3 \times 360/60 = 12 \times 3 \times 360/60 = 216$ 个，单位脉冲分辨率：

$\Delta v/\Delta N = 300/216 = 1.39$ mm/min < 10 mm/min

则测量精度比采取此措施前提高 25/1.39 = 17.7倍，满足设计要求。

v_2 测量值与光码盘脉计数值 N 的转换关系，上述措施表明3 s采样周期内的脉冲数 N 为：

$N = n \times 3 \times 360/60 = 18n$

而 $n = 8.845 \times 2 \times n_2$

又：$n_2 = v_2/\pi D = v_2/\pi \times 140$

所以 $N = 18 \times 8.845 \times 2 \times v_2/\pi \times 140 = 18 \times v_2/24.862\,8$

或 $= 0.724 v_2$（个）

或 $v_2 = 140\pi \times N/18 \times 8.845 \times 2 = 24.862\,86 \times N/18$，或 $= 1.381\,27$（mm/min）

3) 继电控制电路功能　继电控制电路原理如图5.4-31所示。

控制电机T2为Y2A5024型三相异步电机控制电压380 V，控制电流0.2 A。控制电机正反转控制关系为

J1合→电机正转→减速比↑→压片机 n_2↓。

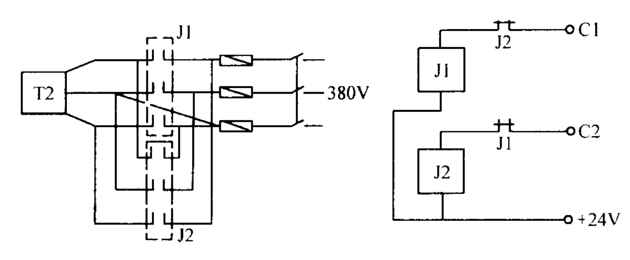


图 5.4-31　控制电机 T2 的继电控制电路

J2 合→电机反转→减速比↓→压片机 n_2↑。

4）微机控制系统设计要求　机电一体化控制系统设计的关键在于，将机电工程项目的设计要求转化为微机控制系统的具体设计要求，包括接口电路要求、控制程序要求及系统配置等。根据前述总体设计方案要求如下。

① 微机系统 I/O 接口电路要求

a）二路 TTL 电平信号输出，经 4M33 驱动 C1、C2 再驱动 J1、J2。

b）一路 TTL 电平信号输入，供系统对脉冲计数测量 v_2。

c）键盘接口。

d）显示（LED）器接口。

② 控制程序设计要求

(a) 可在 300 ~ 1 000 mm/min 范围内任意设定压片机预定值，并转换成相应的光码数值 NSET，在内存中保存。

(b) 可根据光码盘计数值 N 计算出与设定值的差值 ΔN。

(c) 可根据 ΔN 值情况确定闭环控制量　控制量算式，控制量由两部分组成。

a）电机转动时间控制量。

b）电机转向控制信号。

③ 数字控制器算式

a）保证系统稳定，需考虑机电系统惯量。

b）保证速度精度 ±1%，除采样精度来保证速度精度外，还需在控制算式中考虑控制“死区”的范围。所谓“死区”，就是指允许速度波动的范围，在此范围内，调速系统可不改变控制量，以保持系统稳定。

c）保证调速响应时间 < 4 s。即，系统调节周期 < 4 s。

④ 硬件系统配置要求

a）EPROM。

b）接口扩展芯片。

c）简易数字键盘。

d）8 位 LED 显示器。

e）稳压，隔离电源。

(5) 微机调速系统设计

1）系统硬件设计　本着简便、实用的原则，可选用市售工业化单片机应用板：SCB-31-5 再配上继电器 J1 与 J2 的驱动电路、光码盘传感信号电路以及通用键盘显示板。

① 该系统主要应用 SCR-31-5 应用板中的以下资源

Ⅰ）8 KB EPROM 2764 其内存地址为 0000 ~ 1FFFH。

Ⅱ）8155 扩展芯片的 A 口　其命令口地址 7900H，A 口地址 7901H。

② 在 8155 的 PA1 ~ PA7 上配各 MC1413，经此芯片功率放大使 A 口能直接驱动 50 V，500 mA 以下负载，即可与 4M33 直接相连来驱动达林顿管，进而控制 J1 与 J2。

③ 光码盘电路信号引出线直接可接 8031 的 T0（P3.4）。

2）系统软件设计要点

① 程序模块化　如：控制算式模块，数值换算或计算模块。

② 采用中断技术　由于是连续控制程序，主程序循环扫描，定周期（采样周期 = 调节周期）产生中断信号调用中断子程序进行定时调速控制。

③ 合理分配内存单元　41H —— T_1 中断次数。

42、43H —— 线速度设定值 v_{set} 转换成的相应脉冲数 $Nset = F0.724v_{set}$。

44H —— 测量脉冲数与设定值相应脉冲数低位的差 ΔN。

45H —— 由 ΔH 决定的控制电机转动基准时间（20 ms）的次数。

46H —— 由 ΔH 决定的控制电机转动方向字正负。

④ 对 8155 芯片、T_0 及 T_1 初始化　8031 时钟频率6 MHz，其机器周期为 2 ms，定时器计数速率为振荡频率/12。

(a) T_0 用于计数（光码盘输出脉冲计数）

a）CPU 引脚 T_0 每有 1 次 120 的负跳变，计数寄存器 +1。

b）$C/\overline{T} = 1$，计数器工作模式。

c）工作方式 1，（M_1M_0）= 01，16 位计数器（加 1 计数）工作方式。

d）赋 T_0 初值，TH0 = 00H，TL0 = 00H。

(b) T_1 用于定时（20 ms 定时）

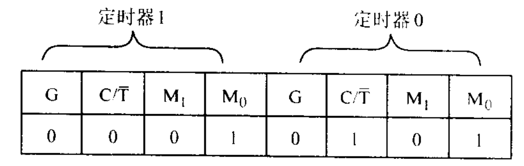
其作用如下。

a）每 20 ms 产生定时脉冲使系统进入 T_1 中断服务子程序。

b）系统工作节奏时间单元为 20 ms，如采样周期 3 s = 150 单元。

(c) TMOD（89H）定时器方式控制字设初始化值。

初始化值：TMOD = #15H



定时器1				定时器0			
G	$C/\overline{T}$	M_1	M_0	G	$C/\overline{T}$	M_1	M_0
0	0	0	1	0	1	0	1

(d) 对 TCON（88H）定时器控制寄存器设初始化值

初始化值 TCON = #55H

定时器1				定时器0			
TF1	TR1	TF0	TR0	IE1	IT1	IE0	IT0
0	1	0	1	0	1	0	1

3）系统软件组成

① 主程序　主要功能为：

a）初始化 8155、堆栈、T_0、T_1。

b）接收 V_{set} 键入值。

c）处理键命令。

② T_1 中断子程序　主要功能为：

a）测量脉冲计数值 N。

b）求出速度偏差值 ΔN。

c）根据速度偏差值确定控制字。

4）主程序设计

① 主程序流程见图 5.4-32。

② 主程序清单（按采用 8155 芯片作为键盘接口编写）

```
      ORG 200H
MAIN: MOV SP, #70H
      MOV A, #03H
      MOV DPTR, #7900H
      MOV @DPTR, A
      ACALL KEY
      ACALL COMND
      MOV TL1, #0F0H
```




```
        MOV TH1, #08H
        MOV TMOD, #15H
        MOV TCON, #55H
DIN:    ACALL KEY
        ACALL COMND
        SJMP DIN
```

③ 主程序说明

a）在主程序中进行系统设定后循环扫描键盘，等待发令，当输入线速设定值以后，将该值保存起来，同时转换成相应的光码盘脉冲数加以保存，然后再循环等待命令键的输入。

b）使用8031＃中 T_0 作为光码盘输出脉冲的计数器。使 T_1 产生20 ms定时脉冲，以此定时调用 T_1 中断服务程序并作为系统的工作节奏基准时间。系统的采样周期3 s，即发生150次 T_1 中断后采样1次。调速电机的转动时间也以20 ms为基准。

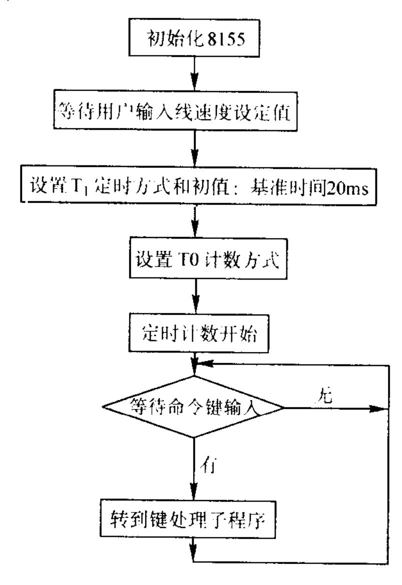


图5.4-32　调速系统主流程序图

5）T_1 中断子程序设计

① T_1 中断子程序流程图（图5.4-33）

② T_1 中断子程序工作原理　当 T_1 中断来临，进入中断子程序时，首先判断是否调速电机的转动次数已够，如果够了则停调速电机。如果中断已发生了150次，即采样周期已到，取出测量脉冲数即TH0和TL0的值与设定值转换成的脉冲数进行比较，根据两者差值的正负决定调整电机的正、反转，差值的大小决定继电器要吸合多少个基准时间（20 ms），即调速电机正转或反转的时间。

(a) T_1 中断来临进入中断子程序，首先判断调速电机的移动次数（时间单元数）是否已等于控制字

a）若等则停电机，并进行第二步判断。

b）若不等，则可直接返回。

(b) 判断 T_1 中断次数（41H）≥＃150H

$\begin{cases}若\geq150，继续下一步（采样周期到）\\若=150，中断返回\end{cases}$

(c) 进入调节程序段，首先求 ΔN ——调求偏差值 ΔN 子程序，根据 ΔN 确定控制字——调确定控制字子程序

(d) 显示测得 V_2 值，初始化TH0、TL0。

(e) 返回。

③ 控制算式

采用简单的分级控制法，C由于机电系统惯性大，可粗略些，分五档由 $\Delta N\rightarrow$控制字U

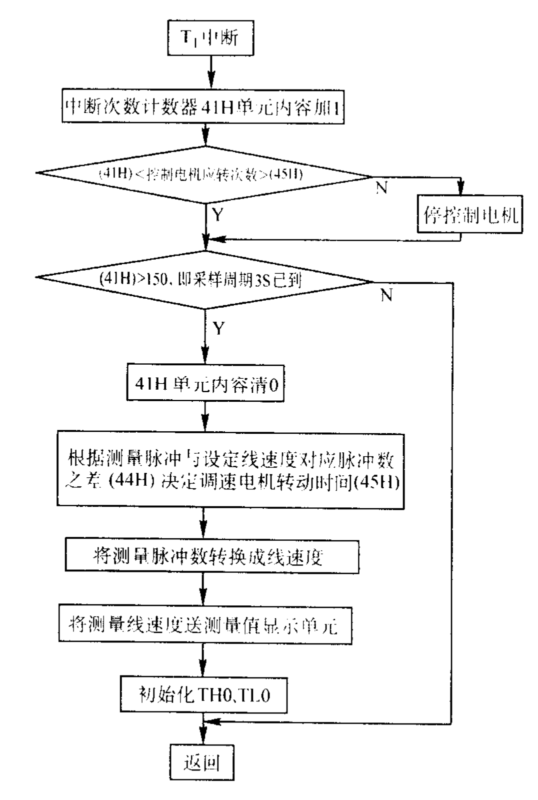


图5.4-33　调速系统 T_1 中断服务程序流程图

$\Delta N\geq80H$	U＝＃40H个（20 ms）基准时间单元
$80H>\Delta N\geq20H$	U＝＃20H
$20H>\Delta N\geq14H$	U＝＃10H
$14H>\Delta N\geq04H$	U＝＃02H
$14H>\Delta N\geq0$	U＝＃0

控制死区04H相应的 $\Delta v_2\approx4\times1.38=5.52$ mm/min＜1±10 mm/min满足控制精度要求

④ T_1 中断子程序程序清单

```
ORG 001BH              ; T1 中断入口
INC 41H                ; 记录 T1 中断次数
MOV A, 41H
CJNE A, 45H, NEXT1     ; 检查控制电机时间单元数等
                       否 (45H) > (41H) 时 C→
                       1; (41H) ≥ (45H) 时 C→0
NEXT1: JC CHEC
MOV DPTR 7901H
MOV A, #00H
MOVX @DPTR, A          ; (41H) ≥ (45H) 时停电机
CHEC: MOV A, 41H       ; (41H) < (45H) 时继续此
                       句也改为 RET1
CJNE A, #96H, NEXT2    ; (41H) < 150D 时 C→1 (41H)
                       ≥ #150D 时 C→0
NEXT2: JC PEND         ; C→1 时中断约束未列 #150D
       MOV 41H, #00H   ; C→0 时采样约束，开始处
                       理数据
       ACALL CACUT1    ; 调 ΔN 差值计算子程序
       ACALL ADJNT     ; 调计算调节量 N 子程序
       MOV DPTR, #7901H  {正转 PA1→1
                         {反转 PA2→2
       MOV A, 46H      ; 将转动方向字 (46H) 送
                       8155A 口
       MOV @DPTR, A
       ACALL CACUT2
```




```
          MOV A, 20H
          MOV A, 21H
          MOV TH0, #00H; 初始化 TH0 TL0 重新升数
                         (此二指令应放大 ACALL
                         CACUTI 指令前办好——可
                         连续采样，以免空格太大)
          RETI
```

6）求调速控制量 U 子程序

电机的调速分五档（差值为测量脉冲数和设定值相应的脉冲数之差）。

```
        ORG 0500H
ADJUT:  MOV A, 44H             ; 调用 ΔH (44H)
        CJNE A, #80H, CLAS1 ΔH≥80H C→0 <C→1
CLAS1:  JNC VEL1               ; ΔN≥#80H ; U←#40H
        CJNE A, #20H, CLAS2
CLAS2:  JNC VEL2               ; ΔN≥#20H, U←#20H
        CJNE A, #14H, CLAS3
CLAS3:  JNC VEL3               ; ΔN≥±14H, U←#03H
        CJNE A, #04H CLAS4
CLAS4:  JNC VEL4               ; ΔN≥#04H, U←02H
        MOV, 45H, #00H
        RET
VEL1:   MOV 45H, #40H
        RET
VEL2:   MOV 45H, #20H
        RET
VEL4:   MOV 45H, #02H
        RET
```

7）键盘显示处理子程序　显示子程序读出显示缓冲区33H～3AH中的每位数码内容，并将该内容所对应的显示码送8279数据口，对倒数第二位数据码加一个小数点后再送显示，因此显示缓冲区中的线速值是实际线速的10倍。再根据闪烁单元38H中的内容，决定对哪一位数码管进行闪烁显示。

第二位数据码加一个小数点后再送显示，因此显示缓冲区中的线速值是实际线速的10倍。再根据闪烁单元38H中的内容决定对哪一位数码管进行闪烁显示。

键盘处理子程度提供了如下4个系统功能键。

显示测量值（B）：读20H、21H单元内线速测量值的BCD码并将其展开送显示。

显示给定值（C）：将给定线速逐位数码暂存单元22～25H中的内容读出送显示缓冲区并显示。

输入给定值（D）：循环接收用户输入的四位线速设定值。

执行给定值（E）：将显示单元中的值存入22H～25H并将其转换居相应的脉冲数。当系统进入一个命令键处理程序处理所需完成的功能后，循环判断是否又有命令键输入，直到命令键再来时才转。

4.3　螺旋焊缝自动跟踪系统设计

螺旋缝埋弧焊钢管的焊接生产过程中，由于焊管在辊道上螺旋行进时振动以及成形不稳定，焊头中心会相对焊缝中心位置随机飘移而产生焊偏现象。为此，研制了螺旋缝埋弧焊缝自动跟踪器。该跟踪器主要由数字图像处理机和数字随动执行器两大部分组成，各部分以单片CPU8031为核心，实现了焊缝自动跟踪控制。

（1）系统组成和原理

系统原理如图5.4-34所示。

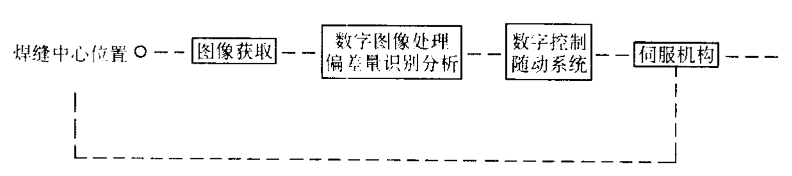


图 5.4-34　焊缝自动跟踪系统原理图

系统可分为图像获取、数字图像处理偏差检测与数字随动控制等部分。

1）图像获取。采用高分辨率CCD面振摄像机仿真人眼获取焊缝信息，安装高度不小于250 mm，对应视野为22 mm×20 mm，单位像素对应实际焊缝尺寸0.085 7 mm。

2）数字图像处理偏差检测。采用多CPU并行处理计算机对图像信息进行模式识别，找出焊缝中心位置，每40 ms给出一次偏差量检测结果。

3）数字随动控制。数字传动计算机根据偏差量检测结果，对GTR－PWM调速系统进行PLD控制，随机调节焊头位置，构成闭环随动系统，实现焊头自动跟踪，防止焊偏。

4）CRT监视器全视场显示焊缝信息，显示跟踪点位置及跟踪结果，系统具有状态显示、偏差量、过流、过压指示、手动/自动切换、声光报警等功能。

（2）图像处理部分

图像处理按以下步骤进行：

图像输入→整形放大→切同步→A/D→偏差量输出→数字控制传动计算机转换→数字图像处理→D/A转换→放大→监视器光标显示检测位置。

图像处理模块具体结构如图5.4-35所示。

图像处理模块由多个处理单元组成。每个单元包含一片8031处理器、一个程序储存器和图像帧存储器Mi及锁存器Rij，所有部件在协处理器的控制下，按重叠交叉式，保证40 ms给出一次处理结果。

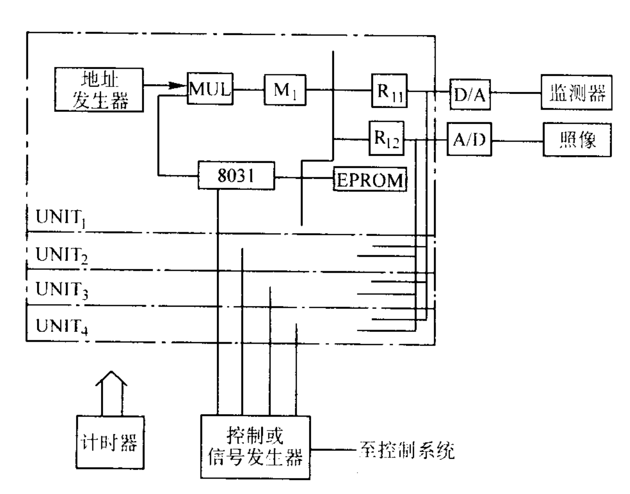


图 5.4-35　图像处理原理结构图

处理单元结构原理如图5.4-36所示。

对于数字图像来说，焊缝自动跟踪系统是一典型的动态目标跟踪问题。若按最高2 m/min的焊速计算，考虑执行电



机时间常数，系统每 6 ms 给出一次偏差检测结果，对应焊管移动线距为 0.2 cm，控制执行机构动作，大大高于人工控制操作频率，可以满足焊接工艺要求。

另外，解决系统的实时性是问题的关键，摄取一幅图像需 20 ms 时间，按 40 ms 给出一次处理结果设计，每分钟要处理 1500 幅数字图像，对于 256 × 256 × 8 bit 的量化图像，每幅图要处理的数据量有 64 K 字节。采用常规结构无法实现。本着结构简单、易实现、具有一定通用性，可灵活编程的原则，构思设计分布式计算机专用并行图像处理装置，在协调控制器作用下，以多个微处理器 8031 并行工作方式，完成每 40 ms 给出一次处理结果的实时性要求。结构具有可编程的灵活性，采用结构化程序设计思想，在系统软件中设计了图像预处理、焊缝中心检测、边缘检测等模块，消除了钢带表面锈迹、污染、划痕、拼缝夹渣、内焊烧穿等随机干扰噪声的影响，利用软硬件相结合的方式，完善焊缝特征的识别。

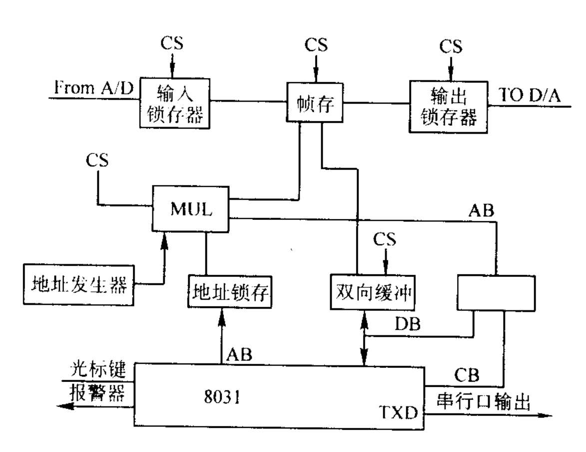


图 5.4-36　图像处理单元结构原理图

处理单元主要由处理器、图像帧存储器、程序存储器和地址发生器等组成，CS 为协调控制器控制信号（control signal）。主要包括 READ、WRITE 等读写及其他一些控制信号。各处理单元可以独立地存储、分析图像，在系统控制信号的作用下，完成图像的分析处理。各处理单元可以相互间传输数据，由当前工作单元送至控制机构，推动执行机构完成纠正偏差量的任务。

（3）数字控制随动部分

在焊缝自动跟踪系统中，采用 MCS－51 系列单片机控制电力电子元件 GTR 供电的 PWM 技术，将直流电源电压转换为频率较高的方波电压，加在直流电机的电枢上面。根据误差的大小，采用最佳 PID 算法，由单片计算机产生方波并控制方波脉冲宽度，改变电枢的平均电压，从而调节电机的转速。由状态来控制电机的运转方向。焊缝自动跟踪系统数字随动装置如图 5.4-37 所示。

图像处理机通过串行口将偏差和状态输入给数字随动装置，数字随动装置每隔 40 ms 接收一次数据，经过计算机处理后产生 PWM 输出波，送给驱动电路，控制直流电机正、反转及转速，使外焊头随外焊缝移动。由于主回路采用 H 型电路，在驱动电路中设计了正、反相互对锁，以防主回路短路，造成系统损坏。

（4）传动部分的硬件构成

传动部分主要由偏差检测电路、整流电路、H 型电路、基极驱动电器、电压、电流检测电路及故障报警电路等组成。

下面介绍硬件电路的主要部分

1）主回路　三相约 36 V 电源经桥式模块整流，大电容滤波后，加在两块由达林顿复合管（GTR）桥臂模块构成的 H

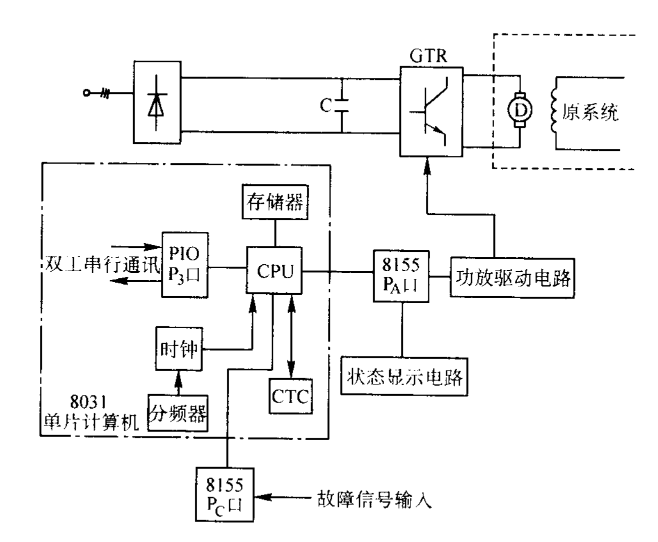


图 5.4-37　外焊缝自动跟踪系统原理图

型电路上，形成双极式 GTR－PWM 放大器。构成控制主回路。

达林顿三极管具有耐压高、工作电流大、开关时间短、饱合压降低、可靠性高等性能。本 H 型回路选用两块三菱公司的 QM30DY－2H 型达林顿模块，主要参数如下：VCEO（SVS）＝1000V，$I_c = 30A$，$h_{FE} > 75$。

2）基极驱动电路　基极驱动电路采用 M57215BL 厚膜电路，以简化系统结构，提高工作可靠性。该厚膜驱动电路可驱动 1 000 V，75 A 以下功率晶体管一个单元，输入为一般 TTL 门电路，输出端接模块基极，为 GTR 提供导通和关断的基极电流（电压）。其典型应用电路如图 5.4-38 所示。

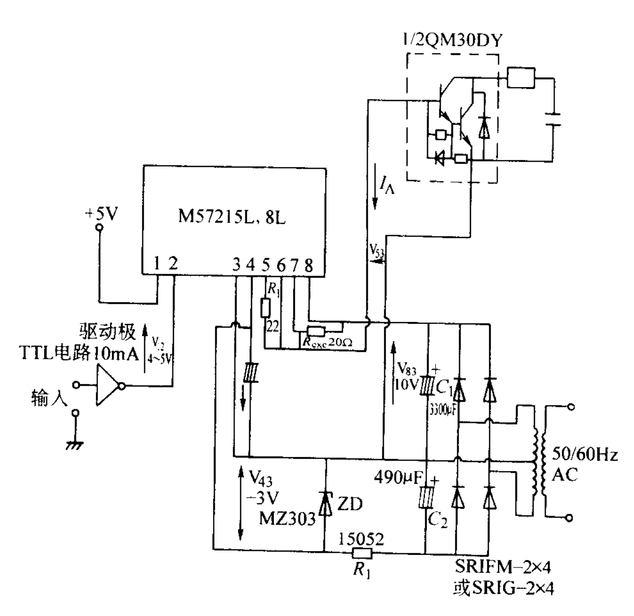


图 5.4-38　厚膜驱动电路 M57215BL 应用电路

3）电压、电流检测电路　由两个光电耦合器 4N25 实现，其故障信号（过压、过流）输入 8155 的 PC 口（PCO，PCI）。

4）通讯报警、状态显示电路　由 8155 的 PA 口实现焊头位置的左右偏、过压/流、手动/自动切换等的发光指示（机箱面板指示灯），并由双时基电路 NE556 来实现故障时的声光报警。

（5）传动部分系统软件设计

随动系统计算机软件程序框图如图 5.4-39 所示。



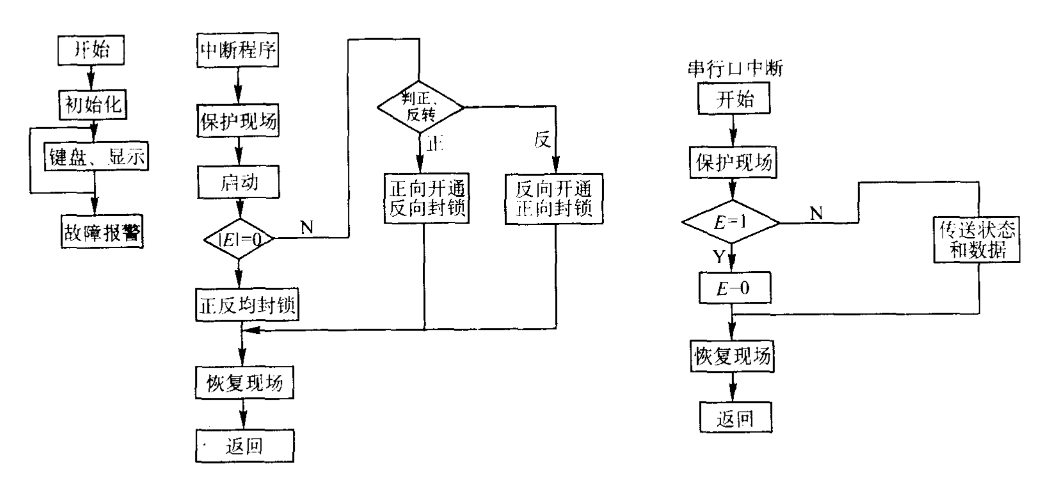


图 5.4-39　随动系统计算机软件程序框图

所述自动跟踪器自投入现场长期使用以来，具有良好的动、静态性能，静态跟踪误差不大于 ±0.3 mm，动态误差不大于 ±0.7 mm，具有极限误差、失踪显示、声光报警、手动/自动切换等功能。它极大地减轻了工人的劳动强度，有效地防止了焊偏，提高了外焊缝焊接质量。

编写：蒋力培（北京石油化工学院）



第5章 焊接机器人及其工程应用

1 焊接机器人产品分类及性能特点

焊接机器人是典型的机电一体化产品，可以按驱动方式、结构、受控运动方式、用途等不同的标准对其进行分类。

按驱动装置的动力源，焊接机器人可分为以下几类。

1）气动式 气压驱动的主要优点是气源方便，驱动系统具有缓冲作用，结构简单，成本低，易于保养。主要缺点是功率质量比小，装置体积大，定位精度不高，难以进行速度控制。气压驱动机器人适用于易燃、易爆和灰尘大的场合。

2）液压式 液压驱动式机器人的特点是结构紧凑，动作平稳，且系统的固有效率高、快速性好，同时液压驱动调速比较简单，能在很大范围内实现无级调速。其主要缺点是易漏油，这不仅影响工作稳定性与定位精度，而且污染环境，液压系统需配备压力源及复杂的管路系统，因而成本也较高。液压驱动多用于要求输出力较大、运动速度较低的场合。

3）电动式 电动式的特点是易于控制，运动精度高，使用方便，成本低廉，驱动效率高，不污染环境。驱动电机又可细分为步进电机、直流电机、无刷直流电机和交流伺服电机等多种。其中，交流伺服电机为目前主要的驱动形式。

按用途来分，焊接机器人可分为两种。

1）弧焊机器人 弧焊机器人的应用范围很广，除汽车行业之外，在通用机械、金属结构等许多行业中得到广泛运用。弧焊机器人是包括各种电弧焊附属装置在内的柔性焊接系统，而不只是一台以规划的速度和姿态携带焊枪移动的单机，因而对其性能有着特殊的要求。在弧焊作业中，焊枪应跟踪工件的焊道运动，并不断填充金属形成焊缝。因此运动过程中速度的稳定性和轨迹精度是两项重要指标。一般情况下，焊接速度约取 5～50 mm/s，轨迹精度约为 ±（0.2～0.5）mm。由于焊枪的姿态对焊缝质量也有一定影响，因此希望在跟踪焊道的同时，焊枪姿态的可调范围尽量大。另外，机器人要便于操作。

2）点焊机器人 点焊机器人系统的典型应用领域是汽车工业，在装配每台汽车车体时，大约 60% 的焊点是由机器人完成。最初，点焊机器人只用于增强焊点作业（往已拼接好的工件上增加焊点），后来为了保证拼接精度，又让机器人完成定位焊作业。这样，点焊机器人逐渐被要求有更全的作业性能，具体来说有：安装面积小，工作空间大；快速完成小节距的多点定位（例如每 0.3～0.4 s 移动 30～50 mm 节距后定位）；定位精度高（±0.25 mm），以确保焊接质量；持重大（30～100 kg），以便携带内装变压器的焊钳；示教简单，节省工时；安全可靠性好。

按结构坐标系特点来分，焊接机器人又可分为以下几类。

1）直角坐标型 这类机器人的结构和控制方案与机床类似，其到达空间位置的三个运动（x、y、z）是由直线运动构成，运动方向互相垂直，其末端操作器的姿态调节由附加的旋转机构实现，如图 5.5-1 所示。这种形式的机器人优点是运动学模型简单，各轴线位移分辨率在操作容积内任一点上均为恒定，控制精度容易提高；缺点是机构较庞大，工作空间小，操作灵活性较差。简易和专用焊接机器人常采用这种形式。

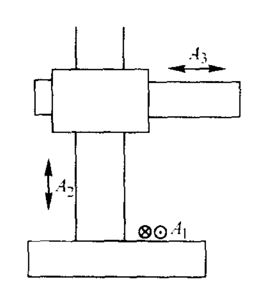


图 5.5-1 直角坐标型机器人

2）圆柱坐标型 这类机器人在基座水平转台上装有立柱，水平臂可沿立柱作上下运动并可在水平方向伸缩，如图 5.5-2 所示。这种结构方案的优点是末端操作器可获得较高速度，缺点是末端操作器外伸离开立柱轴心愈远，其线位移分辨精度愈低。

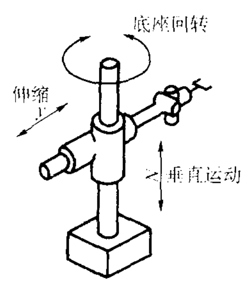


图 5.5-2 圆柱坐标型机器人

3）球坐标型 与圆柱坐标结构相比较，这种结构形式更为灵活。但采用同一分辨率的码盘检测角位移时，伸缩关节的线位移分辨率恒定，但转动关节反映在末端操作器上的线位移分辨率则是个变量，增加了控制系统的复杂性，如图 5.5-3 所示。

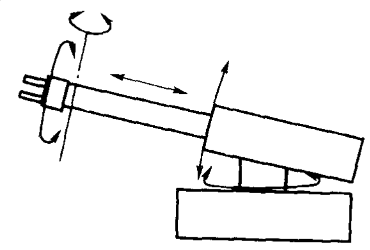


图 5.5-3 球坐标型机器人

4）全关节型 全关节型机器人的结构类似人的腰部和手部，其位置和姿态全部由旋转运动实现，如图 5.5-4 所示，其优点是机构紧凑，灵活性好，占地面积小，工作空间大，可获得较高的末端操作器线速度；其缺点是运动学模型复杂，高精度控制难度大，空间线位移分辨率取决于机器人手臂的位姿。目前焊接机器人大多采用全关节型的结构形式。

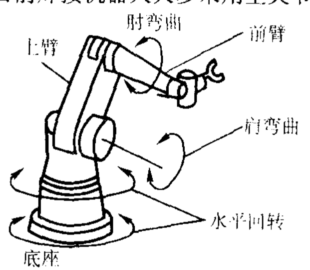


图 5.5-4 全关节型机器人

根据受控运动方式，焊接机器人可分为以下几类。

1）点位控制（PTP）型　机器人受控运动方式为自一个点位目标移向另一个点位目标，只在目标点上完成操作。要求机器人在目标点上有足够的定位精度，相邻目标点间的运动方式之一是各关节驱动机以最快的速度趋近终点，各关节视其转角大小不同而到达终点有先有后；另一种运动方式是各关节同时趋近终点，由于各关节运动时间相同，所以角位移大的运动速度较高。点位控制型机器人主要用于点焊作业。

2）连续轨迹控制（CP）型　机器人各关节同时做受控运动，使机器人终端按预期的轨迹和速度运动，为此各关节控制系统需要实时获取驱动机的角位移和角速度信号。连续控制主要用于弧焊机器人。

总之，焊接机器人的类型很多，可根据不同的分类标准进行分类。同时，对于一个具体的机器人，也可以属于几种类型。

2　焊接机器人系统配置

完整的焊接机器人系统除机器人外还需要有焊接设备、机器人或工件的移动装置、工件变位装置、工件的定位和夹紧装置、焊枪喷嘴或焊钳电极的清理或修整装置、安全保护装置等。并不是每一个焊接机器人系统都必须配备所有这些外围设备，而应根据工件的具体结构情况、所要焊接的焊缝位置的可达性和对接头质量的要求来选择，但机器人的安全保护设施是必不可少的。

2.1　焊接机器人

（1）焊接机器人的选型

焊接机器人型号选择及系统配置是机器人应用设计中的关键环节，应遵循以下原则。

1）技术先进性　焊接机器人主要有操作机、控制器、焊接系统组成，反映技术先进性的主要性能比较见表 5.5-1 ~ 表 5.5-3。

表 5.5-1　机器人按机械结构类型的分类

名称	机器人结构形式	工作范围	说　明
直角坐标机器人			手臂具有三个棱柱关节，其轴线按直角坐标配置；运动学模型简单直观，需要较大的操作空间，可达性差；多做成大型龙门式或框架式机器人
圆柱坐标机器人			手臂至少有一个回转关节和一个棱柱关节，其轴线按圆柱坐标配置；运动学模型简单直观，易于进入空腔和开口部分；水平臂外伸距离越长，位移分辨率越低
极（球）坐标机器人			手臂有两个回转关节和一个棱柱关节，其轴线按极坐标配置；运动学模型较复杂，视觉上也不直观；占用空间较小，操作范围大且操作灵活
关节型机器人			手臂具有三个回转关节；具有最好的操作灵活性和可达性，工作空间大，旋转关节易于密封；运动学模型解算复杂，视觉上不直观，结构刚度较差
柔性装配机器人			它有三个旋转关节和一个移动关节，为水平关节型结构；动力学上的计算比关节型机器人容易，柔顺性好；能够实现高精度和高速度运动

表 5.5-2　操作机性能比较

指　　标	说　　明
结构形式	参见表 5.5-1
负载能力	在全速或加减速状态下
作业范围	带焊钳（焊枪）或不带
自由度数	能满足位姿要求即可，不要求多
电机类型	交流伺服电动机、直流伺服电动机
减速器类型	RV 减速器、谐波减速器或其他减速器
反馈部件	绝对码盘、相对码盘、旋转变压器
自重负载比	操作机自重和负载的比值
加减速性能	本体最大速度和加速度
机械固有频率	该值的高低反映了本体刚度及质量大小
精度	机器人的重复定位精度和轨迹精度

表 5.5-3　控制器性能比较

指　　标	说　　明
控制轴数	控制机器人和周边设备多轴联动能力
插补周期	机器人进行每个周期插补所需时间
控制方式	交流伺服、直流伺服、模数混合控制、全数字控制
对外接口	传感器控制能力、周边设备控制能力、通讯能力
人机界面	操作方便、界面清楚
环境适应能力	电磁兼容性、温度、湿度、振动等
可靠性和可维护性	平均无故障时间 40 000～60 000 h，且易于维护

2）生产厂商综合实力及其技术支持　综合实力强的机器人生产厂商可保证其产品技术的先进性及快速升级换代能力，并具有很强的设备配套能力。同时，还要注意厂商的技术支持，因为机器人是一种复杂的机电一体化产品，从售前、工程实施一直到售后服务都需要很强的技术支持。售后服务往往是薄弱环节，因此当选用国外机器人时，要尽量选择在国内建立了技术服务中心的厂商，以便及时获得维修服务。

3）优化机器人系统配置　根据作业要求，尽量减少机器人系统的自由度数，缩小机器人占用空间，以降低工程成本；尽量减少传感器使用数量，使机器人在尽量确定的环境下工作，避免或少使用价格昂贵的视觉传感器；具有较高的安全性，包括机器人系统自身的安全和操作人员的安全。

4）满足焊接工艺要求　在获得高质量焊接接头条件下具有较高的生产效率，是机器人选型的必要条件。

（2）焊接机器人的生产厂商

根据机器人厂商的知名度、是否建立有技术服务中心及产品已有应用并证明质量可靠等项原则来选购机器人。为便于选择，择其一部分列于表 5.5-4。这里应指出，这些机器人基本上都能满足国内生产企业产品机器人焊接的需要，但在价格性能比上却有较大的差异，其系统配置上变化范围较大，而且在控制器、焊接电源、甚至焊枪等附件上均有各自特色，因此，用户应细致论证后再决定取舍。

2.2　弧焊机器人系统焊接装置

弧焊机器人一般较多采用熔化极气体保护焊或非熔化极气体保护焊方法。无论是熔化极或非熔化极气体保护焊都需要焊接电源、焊枪（焊炬）和送丝机构，但对不填丝的 TIG 焊或等离子弧焊就不必配备送丝机构。在选择焊接装置时应考虑所要焊接的材料种类、焊接规范的大小和电弧持续率等因素。如果机器人和焊接装置是分别采购的，而工厂又希望机器人控制柜能够对焊接参数进行编程和控制，这就必须解决焊接装置和机器人控制柜之间的接口问题，但这个接口不是一般用户自己所能解决的，最好还是由机器人供应商成套提供为好。一套 MIG/MAG 焊机器人系统的基本组成如图 5.5-5 所示。

表 5.5-4　焊接机器人

型　号	用途	自由度	结构形式	额定负载/N	驱动方式	重复精度/mm	动作方式	示教方式	编程容量	生产单位
HRGH－3	弧焊	5	关节型	100	DC	±0.2	PTP，CP	示教盒		国营风华机器厂，哈尔滨工业大学
HRGD－2	点焊	6		650	AC	±0.5				
ZHS—R005	弧焊	5	关节型	120	DC	±0.2	PTP，CP	示教盒	存储 256 kB	大连组合机床研究所
MOTOMAN－SK6	弧焊	6	关节型	60	AC	±0.1	PTP，CP	示教盒，离线编程	2 200 步，1 200 条顺序指令	首钢莫托曼机器人有限公司，日本安川电机株式会社
MOTOMAN－SK120	点焊			1 200		±0.4				
VR－008A	弧焊	6	关节型	80	AC	±0.1	PTP，CP	示教盒	7 000 点（3 500 步，3 500 条顺序指令）	唐山松下产业机器有限公司，日本松下电器产业株式会社
SRV16	弧焊	6	关节型	160	AC	±0.05	PTP，CP	示教盒，离线编程	3 500～8 000 点	德国莱斯（REIS）机床制造公司
SRV130	点焊			1 300		±0.2				
RT330	弧焊	6	关节型		AC		PTP，CP	示教盒，离线编程		奥地利 IGM 公司
IRB2400/10	弧焊	6	关节型	100	AC	±0.06	PTP，CP	示教盒，离线编程	存储 24 MB 35 000 条顺序指令	瑞典 ABB 工业自动化工程有限公司
IRB6000/150	点焊			1 500		±0.5			存储 64 kB 2 500 点	
IR761/125	点焊	6	关节型	1 250	AC	±0.3	PTP，CP	示教盒，离线编程	存储 256 kB	德国库卡（KUKA）公司
RD120	点焊	6	关节型	1 200	AC	±0.4	PTP，CP	示教盒	3 000 步	沈阳新松机器人自动化股份有限公司

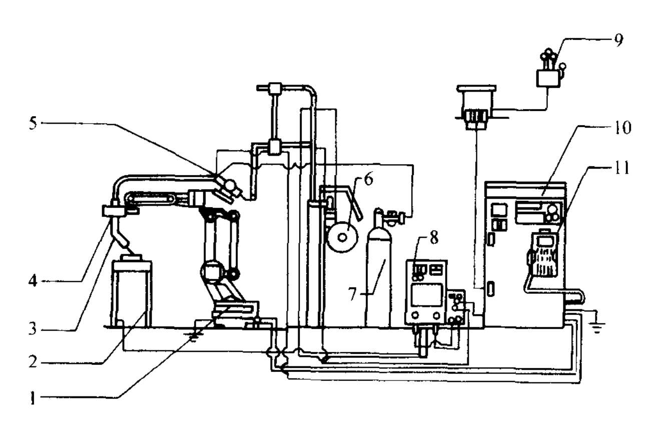


图 5.5-5　弧焊机器人系统的基本组成

1—弧焊机器人；2—工作台；3—焊枪；4—防撞传感器；5—送丝机；6—焊丝盘；7—气瓶；8—焊接电源；9—三相电源；10—机器人控制柜；11—编程器

(1) 焊接电源

选择与机器人配套的焊接电源必须注意负载持续率问题，因为机器人焊接的燃弧率比手工焊高得多，即使采用和手工焊相同的焊接规范，机器人用的焊接电源也应选用较大容量的。例如用直径 1.6 mm 焊丝，380 A 电流进行手工电弧焊时，可以选用负载持续率 60%、额定电流 500 A 的焊接电源，但用同样规范的焊接机器人，其配套的焊接电源必须选用负载持续率 100% 的 500 A 电源或负载持续率 60% 的 600 A 或更大容量的电源。它们之间容量的换算公式：

$$I_{100} = (I_{60}^2 \times 0.6)^{1/2} \qquad (5.5\text{-}1)$$

式中，I_{60} 表示负载持续率 60% 电源的额定电流值，而 I_{100} 为对应负载持续率 100% 的额定电流值。如采用大电流长时间焊接，电源容量最好要有一定裕度，不然电源会因升温过高而自动断电保护，使焊接不能连续进行。目前，可以和机器人配套的熔化极气体保护焊的电源多达几十种，往往使用户难以适从，不知选用哪一种好。这些焊接电源大体上可以分为如下几类。

1) 普通焊接电源　目前机器人配备的比较廉价的焊接电源是普通晶闸管电源，负载持续率一般为 60%。这种电源已普遍用在手工半自动焊，但用于和焊接机器人配套必须注意容量是否合适。另外，这种电源没有更有效的抑制飞溅的功能，当采用短路过渡形式的 CO_2 气体保护焊进行焊接时，飞溅一般较大些。

2) 具有减少短路过渡飞溅功能的气体保护焊电源　选用这种电源要注意，将来机器人应主要是用于焊接较薄的工件，并且采用短路过渡形式的焊接规范进行焊接才有意义。这种电源抑制焊接飞溅的功能各厂商采用的方法不尽相同，如采用波形控制或表面张力过渡控制等技术，但效果都比较显著。这些电源大多是逆变式电源。选用时要注意电源所要求的输入电压，因为有些用 IGBT 的逆变电源，特别是日本产的这类电源，输入电压为三相 200 V，必须同时配备一台大容量的 380～200 V 的三相降压变压器，投资会因此而加大。

3) 颗粒过渡或射流过渡用大电流电源　这种焊接电源大多为晶闸管式，而且容量都比较大（600 A 以上），负载持续率为 100%，适合于采用混合气体保护射流过渡焊、粗丝大电流 CO_2 气体保护潜弧焊或双丝焊等方法来焊接重、大、厚的工件。

4) 有特殊功能的焊接电源　有特殊功能的焊接电源种类很多，如适合铝和铝合金 TIG 焊的方波交流电源，带有专家系统的协调控制（或单旋钮）MIG/MAG 焊接电源等，但目前引起重视的是一种采用模糊控制方法的焊接电源。这种电源对焊丝伸出长度（干伸长）的波动不敏感，并能自动根据焊丝伸出长度的变化相应地调节焊接规范，使焊出的焊缝保持相同的熔宽，而且熔深也不会有大的变化。模糊控制电源比较适合于焊接那些表面有波浪状起伏的工件，或在焊接过程中会有较大变形的较薄工件。

可见，与机器人配套的焊接电源最好是根据工件对象、所用材料和焊接工艺参数来选择所需的功能，不要认为凡是逆变电源或价格高的电源就是最佳的选择。

(2) 焊接传感器

目前，最普及的焊缝跟踪传感器为电弧传感器，它利用焊接电极与工件之间的距离变化能引起电弧电流或电压变化这一物理现象来检测坡口中心，因不占用额外的空间而使机器人可达性好。同时，因是直接从焊丝端部检测信号，易于进行反馈控制，信号处理也比较简单。特别是由于它的可靠性高、价格低而得到了较广泛应用。但该传感器必须在电弧点燃下才能工作，电弧在跟踪过程中还要进行摆动或旋转，故适用的接头类型有限，不能应用于薄板工件的对接、搭接、坡口很小等情况下的接头，在熔化极短路过渡模式下也存在应用上的困难。

光学传感器，尤其是基于三角测量原理的激光视觉传感器系统却具有很多优点。

1) 获取的信息量大、精度高，可以精确地获得接头截面几何形状和空间位置姿态信息，可同时用于接头的自动跟踪以及焊接过程的参数控制，还可用于焊后的接头外观检查。

2) 检测空间范围大、误差容限大，焊接之前可以在较大范围内寻找接头。

3) 可自动检测和选定焊接的起点和终点、判断定位焊点等接头特征。

4) 通用性好，适用于各种接头类型的自动跟踪和参数适应控制，还可用于多层焊的焊道自动规划。

图 5.5-6 为一种激光扫描视觉传感器工作原理：扫描电动机 1 带动转镜 8 将激光束投射到焊件 7 上，角度传感器 9 检测出电动机扫描的角度，线阵光敏感器 4 根据漫反射光检测出激光点在深度方向的位置。根据三角测量原理，即可计算出扫描光点在空间的位置。这样测得扇面内的一系列激光点位置就构成了一个断面。对此信息作进一步处理，就可得出接头的特征位置和其信息。该信息即可用于控制机器人的运动轨迹。这种传感器主要缺点就是要占用一定的额外空间，只有制作的很小、很轻才便于安装在焊枪上；在应用中

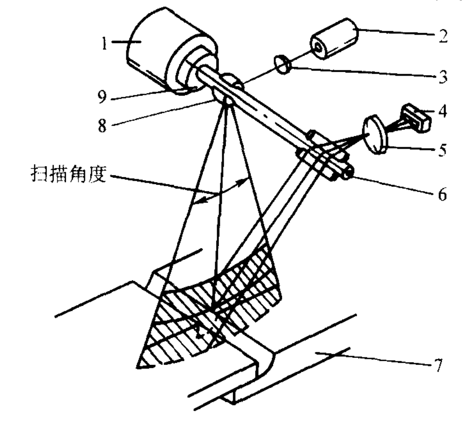


图 5.5-6　激光扫描视觉传感器的结构

1—扫描电动机；2—激光器；3—聚焦透镜；4—线阵光敏感器；5—聚焦物镜；6—检测转镜；7—焊件；8—扫描转镜；9—角度传感器



还要防止飞溅、烟尘等对传感器的有害影响（如使用一段后应更换玻璃），而电弧传感器就没有这方面问题。

(3) 送丝装置

送丝装置包括送丝机、送丝软管和焊枪三部分。弧焊机器人的送丝稳定性关系到焊接能否连续稳定进行，所以，应对送丝装置的重要性给予足够地重视。

1）送丝机　弧焊机器人配备的送丝机可按安装方式分为两种。一种是将送丝机安装在机器人的上臂的后部上面与机器人组成一体的方式；另一种是将送丝机与机器人分开安装的方式。一体式的送丝阻力比分离式的小。从提高送丝稳定性的角度看，一体式比分离式要好一些。目前，弧焊机器人的送丝机采用一体式的安装方式已越来越多了，但对要在焊接过程中进行自动更换焊枪（变换焊丝直径或种类）的机器人，必须选用分离式送丝机。送丝机的结构有一对送丝辊轮的，也有两对辊轮的；有只用一个电机驱动一对或两对辊轮的，也有用两个电机分别驱动两对辊轮的。从送丝力来看，两对辊轮的送丝力比一对辊轮的大些。当采用药芯焊丝时，由于药芯焊丝比较软，辊轮的压紧力不能像用实芯焊丝时那么大，为了保证有足够的送丝推力，选用两对辊轮的送丝机可以有更好的效果。对脉冲TIG焊来说，可以选用连续送丝的送丝机也可以选用能与焊接脉冲电流同步的脉动送丝机。

2）送丝软管　目前软管都是将送丝、导电、输气和通冷却水做成一体的方式，软管的中心是一根通焊丝同时也起输送保护气作用的导丝管，外面缠绕导电的多芯电缆，有的电缆中还夹有两根冷却水循环的管子，最外面包敷一层绝缘橡胶。当送铝焊丝时，应选用特富隆（TEFLON）或尼龙制成的管做导丝管；而送钢焊丝时，一般采用钢制的弹簧管。导丝管的内径应比焊丝直径大1 mm左右。

3）焊枪的选择　焊接机器人用的焊枪大部分和手工半自动焊用的鹅颈式焊枪基本相同。鹅颈的弯曲角一般都小于45°，可以根据工件特点选不同角度的鹅颈，以改善焊枪的可达性。但如鹅颈角度选得过大，送丝阻力会加大，送丝速度会不稳定；而角度过小，如0°，一旦导电嘴稍有磨损，常会出现导电不良的现象。应该注意，当更换不同弯曲角的鹅颈式焊枪后，必须对机器人TCP（工具中心点）进行相应的调整，否则焊枪的运动轨迹和姿态都会发生变化。

4）防撞传感器　对于弧焊机器人除了要选好焊枪以外，还必须在机器人的焊枪把持架上配备防撞传感器。防撞传感器的作用是当机器人在运动时，万一焊枪碰到障碍物，能立即使机器人停止运动（相当于急停开关），避免损坏焊枪或机器人。如果没有安装防撞传感器或传感器不够灵敏，一旦焊枪和工件发生轻度碰撞，焊枪可能被碰歪，如操作者又没有及时发现，由于TCP的变化，随后焊接的路径将会发生较大的变化，而焊出废品。因此，TIG焊炬和MIG/MAG焊枪的把持架上都必须装有防撞传感器。

2.3 点焊机器人系统焊接装置

点焊机器人的焊接装置由焊钳、变压器和定时器等部分组成。如采用直流点焊，在变压器之后还要加整流单元。一套点焊机器人系统的基本组成如图5.5-7所示。

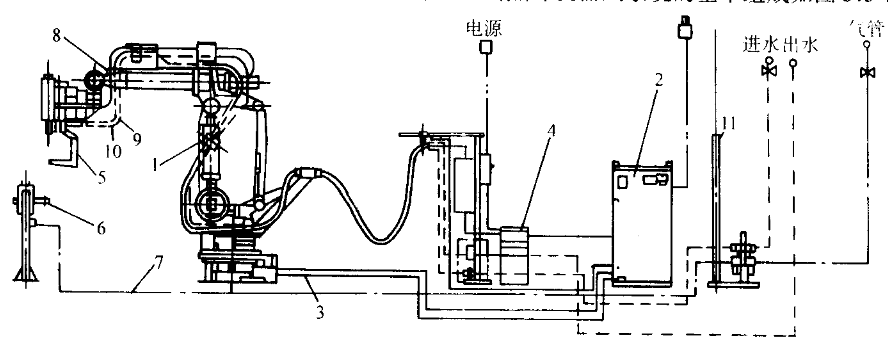


图5.5-7　点焊机器人系统基本组成

1—焊钳；2—机器人控制柜；3—控制电缆；4—点焊定时器；5—点焊钳；
6—电极修整装置；7、8、9、10—气、电、进水、出水管线；11—安全围栏

(1) 点焊机器人焊钳

根据变压器与焊钳的结构关系可将焊钳分为分离式、内藏式、一体式3种形式。早期的点焊机器人都采用前两种方式。分离式焊钳的主要缺点是需要大容量的焊接变压器，电力损耗较大，能源利用率低。这种安装方式由于二次电缆较长，不仅会影响焊钳的可达性，而且电缆还可能钩在工件上影响机器人的运动。内藏式焊钳虽然使二次电缆变短，变压器容量减小，但是，使机器人本体的设计变得复杂。近年来由于变压器可以做得更小，一体式焊钳已经相当普及。一体式焊钳的优点是省掉了粗大的二次电缆及悬挂变压器的工作架，节省了能量。缺点是焊钳质量显著增大，体积也变大。一体式焊钳按用途分为C型和X型两种。图5.5-8为常用的C型和X型点焊钳的基本结构形式。

(2) 点焊机器人的定时器

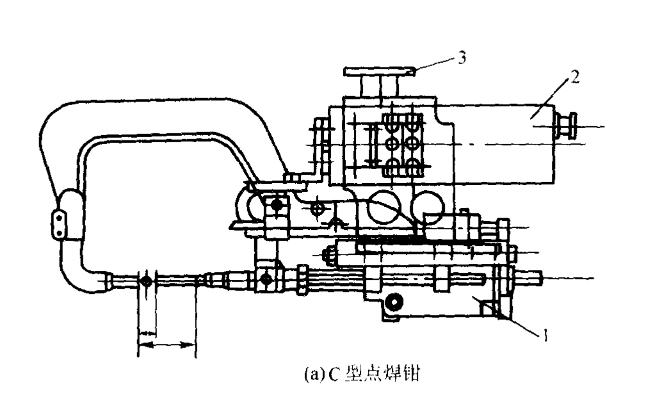
点焊机器人的定时器过去大多是与机器人控制柜分离的，即控制柜只控制机器人的运动、焊钳姿态和开合，定时器控制焊接的电参数和通电时间（周波数），两者之间通过控制柜的I/O口进行通讯。这样的组合方式在编程时不能对焊接参数进行任意编程，只能从定时器预先设定的几组参数中挑选一组。近年来，定时器改用单片机或工控机来控制，这给机器人控制柜直接控制焊接参数带来方便。只要有一个接口，点焊的所有参数都可以在编程时由编程器直接输入和预置，既方便又可靠。一些专门生产点焊机器人的公司，已开发出机器人控制柜和点焊定时器组合成一体的控制柜，可节省占地面积，而且用户不必再考虑控制柜和定时器之间的接口问题了。

(3) 焊钳防撞措施

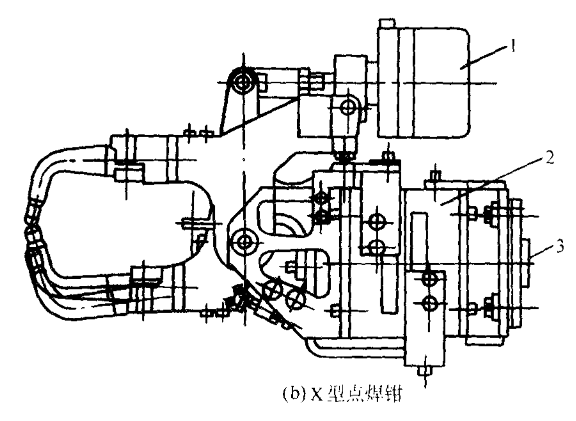
点焊机器人由于焊钳较重不能安装像弧焊机器人那样的防撞传感器，因此要求点焊机器人的控制柜必须具有在机器人或焊钳与周边设备或工件发生碰撞，即在负载超过限定值时，能立即停止机器人运动的功能。目前，有的机器人不但在发生碰撞时能马上停止运动，还能自动向后退少许，避免焊钳与工件顶紧而损坏工件或焊钳。

2.4 焊接机器人系统的外围设备

焊接机器人系统的外围设备大致可分为机器人的底座，工件的固定工作台，工件的变位、翻转、移位装置，机器人的龙门机架、固定机架和移动装置等。工件的固定还需要有胎、夹具。另外还可能需要配备焊枪喷嘴的清理装置，焊丝的剪切装置，焊钳电极的修整、更换装置等辅助设备。下面重点介绍几种。



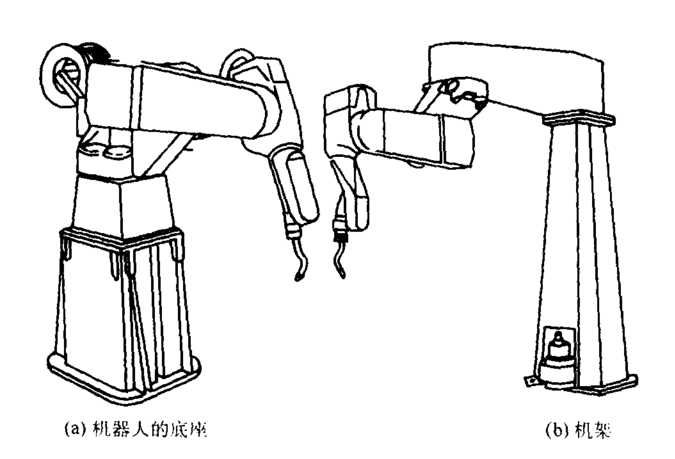
(a) C 型点焊钳



(b) X 型点焊钳

图 5.5-8　两种一体式点焊钳的基本形式

1—电极移动气缸；2—变压器；3—与机器人连接的法兰



(a) 机器人的底座　　(b) 机架

图 5.5-9　机器人的底座和机架

(1) 焊接机器人的底座和机架

焊接机器人的底座和机架如图 5.5-9a、b 所示。是最简单的外围设备，它们的作用都是把机器人安装在一个合适的高度上，图 5.5-9a 的底座是机器人直立安装时采用的，而图 5.5-9b 的机架是机器人倒挂安装时采用的。底座和机架虽然很简单，但它们的作用是不可忽视的。

(2) 工件位置变换机

不同应用场合的工件千差万别，相应的夹具体也是各种各样的。工件位置变换机（简称变位机）要适应工件与夹具体以及作业的要求，一般来说，对变位机的基本要求是：变位机要能把工件变换到最佳位置，以保证机器人工具（如焊枪等）处于最合理的工作状态；变位机要尽可能地满足所有作业位置的变换要求，对于确实难以实现的位置或加工死区，可由人工处理或在下一工作站中通过转变装夹解决；变位机要具有较高的重复定位精度，保证工件加工的一致性和稳定的加工质量；变位机要尽可能地缩短机器人的等待时间，通过两工位或多工位的构造形式，将人工处理时间与机器人的工作时间重叠起来，缩短加工周期，提高生产率；变位机要有足够的强度和刚度，足以抵抗正常外力，使综合变形量不影响机器人的正常作业和工件的焊接质量；变位机运转时必须解决电气导线和气路软管的破坏性缠绕问题，设置必要的引线和进气装置，保护导线和管路不受损坏；变位机用于焊接作业时，焊接电源的负极要尽量靠近被焊工件，并要求电流不通过轴承等接触点较少或接触面积较小的机械零件，以保证起弧质量好和不损坏机械运动器件；对于振动性较大的作业，变位机应与机器人本体通过底座等结构件连成一体，保证机器人与变位机的相对位置精度。

表 5.5-5　各种变位机

类型	图示及工件举例	最大负载 F/N	说明
单轴悬臂		2 000	常用于 0°、180° 2 点或 4 点停留；可用挡铁定位销定位，也可用伺服定位
双轴悬臂		5 000	多用交流伺服电机驱动
单轴双支点		10 000	3 种驱动方式均可使用
双轴双支点		10 000	多采用交流伺服电机驱动
双轴倾斜		5 000	多采用交流伺服电机驱动
转台		5 000	多采用交流电机和气缸驱动
四轴升降		10 000	多采用交流伺服电机驱动



变位机的种类繁多，它根据工件形状、大小、驱动方式、定位方式和位置停留数量的不同要求，在驱动、定位和结构上也各具特点。变位机常用的驱动方式有气压驱动、交流电机驱动和交流伺服电机驱动，相对应的定位方式有气动销定位、挡铁定位和位置伺服定位。气动与交流电机驱动的成本低，多用于位置停留点数少、精度要求居中的作业；而位置伺服电机驱动的造价高，它可以作为机器人的外部轴，由增设的机器人控制单元控制，常用于位置停留点数多、变位机与机器人协调运动和定位精度要求较高的作业中。常用的结构形式有单轴悬臂型、双轴悬臂型、单轴双支点型、双轴双支点型、双轴倾斜型、转台型4轴升降型等，各种变位机示例见表5.5-5。

在实际应用中，根据使用要求，由这些基本形式的变位机又设计出各种复合型的变位机。复合型变位机的特点是：它们拥有两个安装工位，可装夹两个工件，通过变位机的旋转或移动，轮流使一个工件位于机器人的工作空间之内，另一个工件则位于人工操作位，使装卸工件和机器人的作业可以同步进行，大大缩短了辅助时间，提高了机器人的工作效率。

(3) 安全围栏和排烟装置

机器人系统的安全应用是十分重要的，绝对不能马虎大意。建议在决定使用焊接机器人时应首先仔细阅读有关机器人安全的文件。虽然目前各国机器人制造厂商提供的机器人其可靠性都很高，发生早期机器人那样的受干扰而误动作的几率几乎为零，但是机器人的运动速度很快，达3 m/s以上，人员一旦误入机器人工作区，很容易发生机器人伤人的事故。因此必须在机器人工作区域之外设置安全围栏和安全保护装置，防止人员误入危险区内。安全围栏是围在焊接机器人工作区域之外的围栏，高约1.5～1.9 m。为了保持车间空气的清洁，每一个弧焊机器人工作站的上面都应该设置抽除烟尘的装置。

(4) 焊接工装夹具

1) 焊接工装夹具的分类与组成　焊接工装夹具是将焊件准确定位并夹紧，用于装配和焊接的工艺装备。

在焊接生产中，装配和焊接是两道重要的生产工序，根据工艺通常以两种方式完成这两道工序，一种是先装配后焊接，一种是边装配边焊接。我们把用来装配以进行定位焊的夹具称作装配夹具；专门用来焊接焊件的夹具称作焊接夹具；把既用来装配又用来焊接的夹具称作装焊夹具。它们统称为焊接工装夹具。

焊接机器人工作站用的焊接工装夹具有手动、气动和液压的。一个完整的夹具是由定位器、夹紧机构、夹具体三部分组成的。在装焊作业中，多使用在夹具体上装有多个不同夹紧机构和定位器的复杂夹具（又称为胎具或专用夹具）。其中，除夹具体是根据焊件结构形式进行专门设计外，夹紧机构和定位器多是通用的结构形式。

定位器大多数是固定式的，也有一些为了便于焊件装卸。做成伸缩式或转动式的，并采用手动、气动、液压等驱动方式。夹紧机构是夹具的主要组成部分，其结构形式很多，且相对复杂，驱动方式也多种多样。在一些大型复杂的夹具上，夹紧机构的结构形式有多种，而且还使用多种动力源，有手动加气动的、气动加电磁的等等。这种多动力源夹具，称做混合式夹具。在先进工业国家里，对广泛采用的一些夹紧机构已经标准化、系列化，在工艺设计时进行选用即可。我国焊接工作者，正进行着这方面的研究开发工作，相信不久也会有我们自己的系列化、标准化的夹紧机构出现。

焊接工装夹具的特点是由装配焊接工艺和焊接结构的形式决定的，具体如下。

① 由于焊件一般由多个简单零件组焊而成，而这些零件的装配和定位焊，在焊接工装夹具上是按顺序进行的，因此，它们的定位和夹紧是一个个单独进行的。

② 在焊接过程中，零件会因焊接加热而伸长或因冷却而缩短，为了减少或消除焊接变形，要求工装夹具能对某些零件给予反变形或者作刚性的固定；为了减少焊接应力，又要允许某些零件在某一方向可以自由伸缩。因此，焊接工装夹具不是对所有的零件都作刚性的固定。

③ 对焊接工装夹具而言，装焊完的结构，尺寸增大，质量增加，形状变得复杂，增加了从工装夹具上卸下的难度。

④ 对用于熔焊的夹具，工作时主要承受焊件的重力、焊接应力和夹紧力，有的还要承受装配时的锤击力；用于压焊的夹具还要承受顶锻力。

⑤ 焊接工装夹具往往是焊接电源二次回路的一个组成部分，因此绝缘和导电是设计中必须注意的一个问题。

⑥ 焊接工装夹具一般比较大。因此，设计难度较大，特别是定位点、夹紧点的数量、选位和两者的对应关系，都会影响夹具的功能和质量。

⑦ 焊接工装夹具主要用来保证焊接结构各连接件的相对位置精度和整体结构的形状精度。

2) 对焊接工装夹具的设计要求

① 焊接工装夹具应动作迅速、操作方便，操作位置应处在工人容易接近、最宜操作的部位。特别是手动夹具，其操作力不能过大，操作频率不能过高，操作高度应设在工作人员易用力的部位，当夹具处于夹紧状态时，应能自锁。

② 焊接工装夹具应有足够的装配、焊接空间，不能影响焊接操作和焊工观察，不妨碍焊件的装卸。所有的定位元件和夹紧机构应与焊道保持适当的距离，或者布置在焊件的下方或侧面。夹紧机构的执行元件应能够伸缩或转位。

③ 夹紧可靠，刚性适当。夹紧时不破坏焊件的定位位置和几何形状，夹紧后既不使焊件松动滑移，又不使焊件的拘束度过大而产生较大的应力。

④ 为了保证使用安全，应设置必要的安全连锁保护装置。

⑤ 夹紧时不应损坏焊件的表面质量，夹紧薄件和软质材料的焊件时应限制夹紧力，或者采取压头行程限位，加大压头接触面积，加添铜、铝衬垫等措施。

⑥ 接近焊接部位的夹具，应考虑操作手把的隔热和防止焊接飞溅物对夹紧机构和定位器表面的损伤。

⑦ 夹具的施力点应位于焊件的支承处或者布置在靠近支承的地方，要防止支承反力与夹紧力、支承反力与重力形成力偶。

⑧ 注意各种焊接方法在导热、导电、隔磁、绝缘等方面对夹具提出的特殊要求。例如，凸焊和闪光焊时，夹具兼作导电体；钎焊时夹具兼作散热体。

⑨ 用于大型板焊结构的夹具。要有足够的强度和刚度，特别是夹具体的刚度，对结构的形状精度、尺寸精度影响较大，设计时要留有较大的裕度。

⑩ 在同一个夹具上，定位器和夹紧机构的结构形式不宜过多，并且尽量只选用一种动力源；工装夹具本身应具有较好的制造工艺性和较高的机械效率；尽量选用已通用化、标准化的夹紧机构以及标准的零部件来制作焊接工装夹具。

3　焊接机器人路径规划

焊接机器人路径规划的涵义主要是指对机器人末端焊枪轨迹的规划。焊枪轨迹的生成是将一条焊缝的焊接任务进行划分后，得到的一个关于焊枪运动的子任务，可用焊枪轨迹序列 $\{P_{bi}\}$ $(i=1, 2, \cdots, n)$ 来表示。通过选择和调整机器人各运动关节，得到一组合适的相容关节解序列 $J=$



$\{A_1, A_2, \cdots, A_n\}$，在满足关节空间的限制和约束条件下提高机器人的空间可达性和运动平稳性，完成焊缝上的焊枪轨迹序列。机器人焊接路径规划不同于一般移动机器人的路径规划，它的特点在于对焊缝空间连续曲线轨迹、焊枪运动的无碰路径以及焊枪姿态的综合设计与优化。

3.1 焊接机器人无碰路径规划

随着焊接生产中机器人应用水平的不断提高，离线编程日益受到重视。避免焊枪与工件的碰撞，是弧焊机器人离线编程中必须考虑的重要因素。哈尔滨工业大学在开发弧焊机器人离线编程系统的过程中，针对机器人弧焊的特点，提出了以启发式搜索为核心的无碰路径规划方法。经实验验证，方法高效可靠。在通过CAD系统输入工作区几何信息之后，规划系统自动规划出从引弧点到收弧点任一时刻的焊枪位置和姿态，在无碰的条件下取得了满意的焊接质量。

(1) 问题分析

1) 机器人弧焊的特点　从无碰路径规划的角度分析机器人弧焊的特点，主要有以下两点。

① 焊接过程中焊枪末端始终对准焊缝，而焊枪姿态可以变化，这使路径规划问题的维数降低。

② 规划目标是在障碍约束下取得尽可能好的焊接质量，一定焊枪姿态下所取得的焊接质量是规划时需考虑的重要因素。

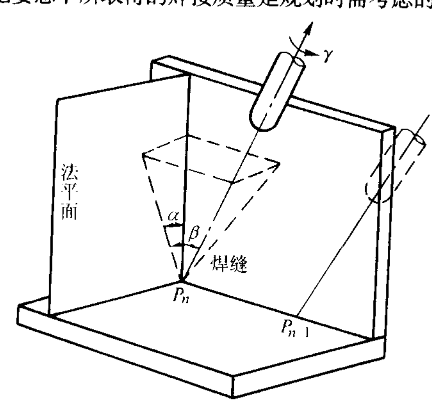


图 5.5-10　焊枪姿态示意图

2) 焊枪姿态的描述　由特点①可知，在喷嘴高度一定的情况下，对给定焊缝，焊枪末端的轨迹是一定的。因此，可将焊缝曲线离散为若干个编程点。路径规划的任务即是确定出各编程点上的焊枪姿态。如图5.5-10所示，P_n 为当前编程点，P_{n-1} 为前一编程点，焊枪相对于焊件的姿态用工作角 α，行走角 β 和绕自身轴线自转角 γ 确定。γ 对工艺效果没有影响。而 α、β 如果不合适，则会产生不同程度的咬边、焊瘤、焊缝凸起超高、焊脚不对称等缺陷。

(2) 问题建模

1) 工艺模型　弧焊机器人无碰路径规划的目标是取得尽可能好的焊接质量。因此，首先要建立焊枪姿态影响焊接质量的工艺模型。以 α 为例，定义图5.5-11所示的工作角质量函数 $g(\alpha)$。$[\alpha_D, \alpha_U]$ 范围内的焊接质量是可接受的。α_B 为取得最优焊接质量的理想工作角，其对应的质量函数值为1。同样，可以定义 $g(\beta)$、$[\beta_D, \beta_U]$ 与 β_B。并定义焊枪姿态质量函数

$$g(\alpha,\beta) = g(\alpha)g(\beta) \tag{5.5-2}$$

$g(\alpha)$ 与 $g(\beta)$ 具有一致的形式，都用分段正弦函数近似表示。

2) 几何模型　已有的规划方法多用凸多面体表示工作区的物体。而对生产中实用的系统，凸多面体计算复杂，难以满足实际需求，故用长方体体素的组合来表示工件和焊枪。

(3) 焊枪姿态启发式搜索

对每个编程点，通过状态搜索来确定焊枪姿态。在 $(\alpha、\beta、\gamma)$ 构成的三维状态空间内，盲目搜索的效率是无法接受的，必须在搜索过程中引入启发信息。

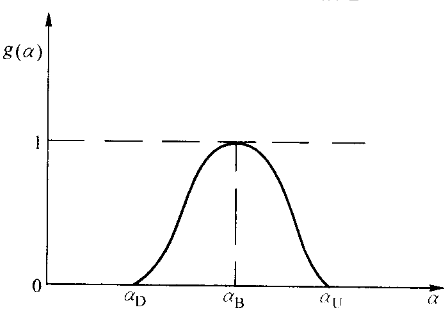


图 5.5-11　工作角质量函数

1) 自转角 γ 启发搜索　由于自转角不影响焊接质量，故对 $(\alpha、\beta、\gamma)$ 的搜索分两个阶段进行。在第一阶段中，工作角 α、行走角 β 固定为理想值 (α_B, β_B)，仅对 γ 进行搜索，以尽可能取得最优的焊接质量。

希望尽快找到无碰的姿态。定义启发函数

$$f(n) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{k} f_{i,j}(n) \tag{5.5-3}$$

式中，$f_{i,j}(n)$ 为组成工件的第 i 个长方体，在组成焊枪的第 j 个长方体中的插入体积。$f(n)$ 为整个焊枪与工件发生干涉的总干涉体积，称为碰撞程度函数。通过以上定义的启发函数，控制搜索向碰撞程度小的方向进行。如果在第一阶段搜索过程中，未搜到无碰的 γ，说明无法取得最优的焊接质量，则将碰撞程度最小的 γ 定义为 γ_s，开始第二阶段的搜索。

2) 均质步长模式搜索法　在第二阶段搜索中，将 γ 固定为 γ_s，仅对 (α, β) 进行二维搜索。此时，如果按一般有约束最优化问题求解，应将质量函数作为目标函数，避免碰撞作为约束。显然由于目标函数简单，而约束条件复杂，难以得到有效解决。

我们转换观察问题的角度，将式(5.5-3)中的碰撞程度函数作为目标函数，从 $(\alpha_B、\beta_B)$ 点出发，搜索目标函数最小的 (α, β)。搜索过程中每步步长按质量函数值均匀递减确定，称为均质步长。这样，寻找焊接质量尽可能好的无碰焊枪姿态的问题就转化为在均质步长下尽快找到无碰焊枪姿态的问题。

采用HJ模式搜索法寻优。在实验移动中通过水平探测和垂直探测搜索碰撞程度减小的方向。然后沿该方向通过模式移动进行加速。实验移动和模式移动交替进行，直至找到无碰的 (α_s, β_s)。

3.2 焊接机器人路径自主规划

(1) 路径自主规划的定义及特点

对于空间某指定焊缝，综合考虑焊接姿态的优化问题及机器人运动学的优化问题，在焊接作业空间中寻找一条最优的机器人焊接运动轨迹及其相应的焊接姿态，这就是弧焊机器人路径自主规划。如果焊接作业空间中存在障碍，规划过程中还需考虑防止碰撞的问题。

这一定义既适用于非冗余度弧焊机器人，又适用于冗余度弧焊机器人系统的规划问题。对于非冗余度弧焊机器人及焊缝固定不动的冗余度弧焊机器人系统，上述定义中的焊接姿态仅指焊枪姿态，焊接作业空间也仅指焊枪运动空间。由于此时焊接运动轨迹也就是指焊缝的位置序列，已经确定无需规划，所以，“在焊接作业空间中寻找一条最优的机器人

焊接运动轨迹及其相应的焊接姿态”实质上仅指“在焊枪运动空间中寻找一条最优的焊枪姿态”。

从上述定义可以看出，弧焊机器人路径自主规划问题与机器人学中的路径规划问题在概念上相符，同时它又具有如下的特殊性。

1）焊接路径通常为连续路径，而且在规划前其位置序列已由焊缝在某种程度上给出了严格的限制。尤其对于空间复杂焊缝，其待规划位置序列对规划算法进行了严格的限制，加大了规划的难度。

2）针对某一指定焊缝，由于焊接参数规划对焊接姿态提出明确的要求，这就在路径自主规划焊接姿态时对规划算法产生了较强的约束，从而加大了规划的难度。

3）目前的工业用弧焊机器人通常为冗余度弧焊机器人。对于空间复杂焊缝，为提高规划能力，需要考虑解决冗余度的优化问题。弧焊机器人的冗余度优化问题与机器人学中的不同，它是一个综合复杂的问题，需全面考虑各种性能指标，不但要使规划结果满足机器人运动学的要求，而且需要满足焊接工艺的要求。

4）对于多冗余度的运动学协调问题，由于某些焊接工艺特点的要求（如“船形焊”的要求等）决定了路径规划任务的描述及实现方法与机器人学领域存在着明显的不同。

（2）冗余自由度弧焊机器人路径规划的优化思想

1）冗余自由度弧焊机器人的概念　在机器人学中，冗余自由度（下面简称冗余度）机器人是指操作手所具有的自由度多于完成某一任务所需要的最少自由度数的一类机器人。由于机器人完成焊接任务所需的最少自由度数为5，所以可以得出：对于焊接任务来讲，自由度数超过5的弧焊机器人称为冗余度弧焊机器人。

由于工业弧焊机器人一般为6自由度，所以研究冗余度弧焊机器人的优化问题具有实用价值。

2）冗余度弧焊机器人路径规划优化控制的内涵　对于焊接质量控制来讲，焊枪的姿态路径和焊接参数是一个紧密耦合的统一整体。一方面在机器人路径规划中的焊枪姿态决定了施焊时的行走角和工作角，机器人末端执行器的运动速度也决定了焊接速度，而行走角、工作角、焊接速度等都是焊接参数的一项重要内容；另一方面，从焊接工艺和焊接质量控制角度来讲，焊接参数中的焊接速度，焊枪行走角等参数的调整又必须在机器人运动路径规划中得以实现。而对于空间复杂焊缝，焊接姿态路径的实现又是与机器人自身的运动学优化问题密不可分。一条焊缝可由焊缝上的特征点的有序集合来表示。

$$S=[P_1,P_2,\cdots,P_i,\cdots,P_m] \tag{5.5-4}$$

式中，S 为焊缝；P_i 为焊缝上的一个特征点，$i=1，2，\cdots，m$；i 的值为1和 m 时分别表示焊缝的起始点和终止点。焊缝的特征点由两个特征矢量组成，即

$$P=[P_L,P_F] \tag{5.5-5}$$

式中，P_L 为焊缝位置矢量，它表示焊缝上该点在基坐标系下的坐标值：

$$P_L=[x,y,z] \tag{5.5-6}$$

式中，P_F 为焊缝的形式矢量，它表示焊缝上该点的姿态，焊缝的姿态由该点的焊缝前进方向矢量 S 和焊缝的法向矢量 f 表示。

一条确定的焊缝 S 离散后，焊接路径 P_L 即确定下来，如何根据 P_F 对机器人运动轨迹中的焊枪姿态进行规划，从而既保证焊接质量，又保证在满足机器人各种约束条件下的运动学优化控制，就涉及到路径规划中的优化问题。

对于关节型冗余度弧焊机器人，路径规划的优化结果体现在关节级上，即在其关节空间搜索出一个与焊缝 S 相对应的关节序列 $\theta_j^i=[\theta_1^i,\theta_2^i,\cdots\theta_n^i]$，其中：$i=1，2，\cdots，m$；$j=1，2，\cdots，n$；$n$ 为自由度数。

3）优化思想

① 控制变量法　冗余自由度机器人的运动轨迹规划的一个关键问题是“冗余自由度”的处理问题。将冗余关节变量“消除”，使冗余自由度机器人的运动学优化问题转化为非冗余自由度机器人的运动学优化问题，这就是控制变量法。如果机器人具有多个冗余的自由度，则可采取逐级控制冗余关节变量的方法，即先优化控制第一个冗余关节变量，再优化控制第二个冗余变量，然后依次类推，直至没有冗余关节。如果机器人的姿态结构冗余，则取最末关节作为控制变量；若位置机构冗余，则取邻近基座的第一关节作为控制变量。

② 多性能指标融合控制法　控制变量法的优化控制原则可以根据弧焊机器人的工作要求和实际工作环境来确定。本节选定的需优化控制的性能指标有：机器人焊接姿态参数；运动位置约束；机器人运动平稳性。

为对上述各性能指标进行综合控制，本文采取一种叫多性能指标融合控制法。在本节中，性能指标确定之后，多性能指标的融合控制通过加权的方法来实现，加权系数的大小反映了每个指标的优化优先权的高低。融合性能指标为：

$$H(A_j)=\frac{N_w\times C_w+N_s\times C_s+N_p\times C_p}{N_1} \tag{5.5-7}$$

式中，自变量 A_j 为各关节角；N_w、N_s、N_p 分别为焊接参数、运动平稳性、位置约束的加权系数值；C_w、C_s、C_p 分别为上述各性能指标值；$N_1=N_w+N_s+N_p$。

以 $H(A_j)$ 增大为优化目标，各加权系数在0～1之间取值，以 N_w 为例说明，即

$$N_w=\begin{cases}1-\dfrac{C_w}{C_{w0}} & C_w<C_{w0}\\ 0 & C_w\geqslant C_{w0}\end{cases} \tag{5.5-8}$$

式中，C_{w0} 为 C_w 的最大数值，当 $C_w\geqslant C_{w0}$ 时，该项性能指标就不予考虑了。同理可求得 N_s 和 N_p。

（3）V01弧焊机器人路径规划的优化控制

1）各性能指标函数的确定

① 焊接姿态参数函数　在焊接过程中，通常以行走角和工作角来表示焊枪姿态。对某种确定的焊缝形态，可以寻找到获得最优焊接质量的行走角和工作角。由焊接试验得知，在一定范围内偏离最佳行走角和工作角仍能满足焊接质量和成形的要求，但如果行走角和工作角偏离过大，会使焊接成形及质量明显变坏，产生缺陷。这里利用由人工神经网络获得的焊接姿态参数知识库，得出空间角焊缝（如空间相贯线）的最佳行走角和工作角及其满足焊接质量和成形要求的偏差范围。

对于焊缝特征点的有序集合 S 中的某一特征点 P，行走角、工作角分别记为 α、β，两者最佳值分别记为 α_0、β_0，两者偏差的最大值分别为 $\Delta\alpha_{max}$、$\Delta\beta_{max}$。定义焊接姿态参数函数：

$$C_w=\frac{K_0}{2}\times\left[K'\frac{\Delta\alpha_{max}^2-(\alpha-\alpha_0)^2}{\Delta\alpha_{max}^2}+\frac{\Delta\beta_{max}^2-(\beta-\beta_0)^2}{\Delta\beta_{max}^2}\right] \tag{5.5-9}$$

式中，K_0 为焊接姿态参数相对于其他性能指标的优先加权系数，本文取值为1.6；K' 为行走角与工作角之间的加权系数，取值为0.85。

② 运动位置约束函数　这里定义运动位置约束函数



$$C_p = \sum_{j=1}^{6} \frac{4(\theta_{jmax} - \theta_j) \times (\theta_j - \theta_{jmin})}{(\theta_{jmax} - \theta_{jmin})^2} \qquad (5.5\text{-}10)$$

式中，θ_{jmax}、θ_{jmin}分别代表各关节的上、下边界极限。

V01弧焊机器人是从日本DAIHEN公司引进的关节型示教再现式机器人，具有6个转动自由度。对于V01弧焊机器人，考虑了以下3种位置约束：关节极限位置；操作机自身干涉区；操作机退化区。

操作机的退化点发生在第5关节变量$\theta_5 = 90°$时，取其$\pm 5°$的范围为退化区。因此，根据V01弧焊机器人的工作任务，将θ_5的限制位置设为$85° \geq \theta_5 \geq -50°$，从而避免操作机进入退化区。操作机的自身干涉发生在机器人各关节杆件之间，自身干涉区域的边界线可用抛物线逼近。考虑到退化、自身干涉和极限位置的约束，V01机器人各关节角的边界限制即可确定下来，列于表5.5-6。有了各关节角的边界限制位置，就可以计算C_P值了。

表5.5-6 V01弧焊机器人各关节角的边界极限

关节变量	1	2	3	4	5	6
θ_{jmax}/(°)	+170	+80	+70	+180	+85	+180
θ_{jmin}/(°)	-170	-80	-60	-180	-50	-180

③ 运动平稳性函数　这里以关节广义位移之和C_S为目标启发函数。

$$C_S = \sum_{j=1}^{6} K_j K'_j \Delta\theta_j \qquad (5.5\text{-}11)$$

式中，K_j为加权系数，K'_j为当量系数，$\Delta\theta_j$为关节j的广义角位移量。各关节广义位移之和反映了机器人的运动幅度的大小。在完成一定的工作任务情况下，机器人关节位移值越小，则整机消耗的能量就越小。在一定的驱动装置下，完成任务的速度越快，所需的时间越短。加权系数是考虑各个关节的转动惯量的大小不同而乘的系数，对于机器人基层的关节杆件，一般其质量都较大，而且它还要带动其后的所有关节杆件运动，所以在广义关节位移之和C_s中占有比重较大，其加权系数也较大。而末端关节的惯量较小，运转也较灵活，所以加权系数较小。K'_j将关节变量进行当量化。另外，它也与各关节变量的取值范围大小有关，起到平衡各关节的位移值。它的大小与关节变量取值范围大小成反比。根据V01机器人的结构特点对K_j和K'_j取值为：

$$K_j = [K_{j1}, K_{j2}, \cdots, K_{j6}] = [1, 0.9, 0.8, 0.4, 0.2, 0.1]$$

$$K'_j = \frac{10}{\theta_{jmax} - \theta_{jmin}} \qquad (5.5\text{-}12)$$

2）针对空间复杂焊缝的路径规划过程　焊接机器人末端焊枪的空间描述是由焊枪尖端的空间位置和空间姿态表示的。空间姿态矩阵是具有9个元素的方向余弦矩阵，根据余弦矩阵的性质，它具有3个不在同一行或同一列的元素才是独立的，所以可用3个参量来表示姿态矩阵。也就是说，物体的姿态只决定于3个独立变量可以取作顺序绕坐标系3个轴旋转的角度。

V01弧焊机器人是以$z-x-z$型欧拉角来表示焊枪姿态的，即首先绕原坐标系的Z轴旋转φ角，再按新坐标系的X轴旋转ϕ角，最后绕新坐标系Z轴旋转ψ角。φ、ϕ和ψ分别称为进动角、章动角和自转角。其中，自转角ψ表现为绕焊枪自身轴线的转角，它对于焊接过程来说是一个冗余自由度。

用空间相贯线焊缝对上述方法进行了验证，整个规划过程如下。

① 考虑V01弧焊机器人的工作空间，给出相贯线模型的尺寸大小、空间位置，调用模型生成子程序，形成焊缝上特征点的有序集合S，同时即得到每个焊缝特征点的空间位置坐标xyz以及前进方向矢量s和法向矢量f。

② 从焊接参数知识库中，对应某个焊缝特征点P，按前进方向矢量s和法向矢量f选取最佳焊枪姿态参数。

③ 调用欧拉角反解算法，求得欧拉角中的进动角φ、章动角ϕ。

④ 运用包括焊接姿态参数在内的多性能指标融合控制法优化自转角ψ。

a）设定ψ的初值，调用逆运动学算法求出该焊缝特征点P对应的各关节角A_j。

b）利用式（5.5-8）求各加权值的方法计算N_w，N_s，N_p。

c）利用式（5.5-9）～式（5.5-11），式（5.5-7）计算各性能指标C_w，C_S，C_p及H（A_j）。

⑤ 在焊枪姿态偏差允许的范围内改变行走角和工作角的取值，重复③和④的过程，搜索出最优的行走角α_o、工作角β和自转角ψ。

⑥ 根据最优的行走角和工作角求得机器人的进动角φ、章动角ϕ，结合最优的自转角ψ，求得为使机器人以要求的位姿达到此焊缝特征点的各关节角A_j。

⑦ 重复②～⑥的过程，就可以在机器人关节空间中按搜索出一个与焊缝S相对应的最优关节序列$\theta_j^i = [\theta_1^i, \theta_2^i, \cdots, \theta_6^i]$，其中$i = 1, 2, \cdots, m$；$j = 1, 2, \cdots, 6$。

4 焊接柔性制造单元（WFMC）和焊接柔性制造系统（WFMS）

4.1 柔性制造单元（FMC）和柔性制造系统（FMS）的定义及特性

柔性制造单元（Flexible Manufacturing Cell）FMC是在制造单元的基础上发展起来，又具有FMS的部分特点的一种单元。具有独立加工的能力，部分具有自动传送和监控管理的功能，可实现某些零件的多品种小批量的加工。部分FMC还可以实现24 h无人运转，投资没有FMS大，技术上容易实现，因而深受用户欢迎。FMC可以作为FMS中的基本单元，若干个FMC可以发展组成FMS。FMC的构成有两大类：一类是加工中心配上托盘交换系统，另一类是数控机床配工业机器人。FMC的特点是：同步加工，即在单元计算机控制下，可在不同或同一机床上进行不同零件的加工；在单元计算机控制下，可组成柔性制造系统并进行通信；在机床加工过程中可自动进行刀具的更换；在机床加工过程中实现加工过程监控。FMC的效益体现在：增加了柔性；实现了24 h连续运转；生产利润高；便于实现计算机集成生产系统。

在我国有关标准中，FMS（Flexible Manufacturing System）被定义为：柔性制造系统（FMS）是由数控加工设备、物料运储装置和计算机控制系统组成的自动化制造系统，它包括多个柔性制造单元，能根据制造任务或生产环境的变化迅速进行调整，适用于多品种、中小批量生产。

还有一种更直观的定义是：柔性制造系统是至少由两台机床，一套物料运输系统（从装载到卸载具有高度自动化）和一套计算机控制系统所组成的制造系统，它采用简单地改变软件的方法便能制造出某些部件中的任何工件。

柔性制造系统的概念尚无统一的定义，但综合起来可以认为：柔性制造系统是在自动化技术、信息技术和制造技术的基础上，通过计算机软件科学，把工厂生产活动中的自动化设备有机地集成起来，打破设计和制造的界限，取消图纸、工艺卡片，使产品设计、生产相互结合而成的，适用于中、小批量和较多品种生产的高柔性、高效率的制造系统。



FMS的各种定义的描述方法显然不同，但它们都反映了FMS应具备如下特点。

1）从硬件的形式看有以下三点：

① 有两台以上的数控机床或加工中心以及其他的加工设备，包括测量机、清洗机平衡机、各种特种加工设备等；

② 有一套能自动装卸的运输系统，包括刀具的贮运和工件及原材料的贮运。具体结构可采用传输带、有轨小车、无轨小车、搬运机器人、上下料托盘工作站等；

③ 有一套计算机控制及信息通信网络控制系统。

2）从软件内容看主要有：

FMS的运行控制系统、FMS的质量保证系统和FMS的数据管理和通信系统。

3）从FMS的功能看它必须是：能自动管理工件的生产过程，自动控制制造质量，自动进行故障诊断及处理，自动进行信息收集及传输；简单地改变软件或系统参数，便能制造出某一工件族的多种工件；物料的运输和贮存必须是自动的（包括刀具等工装和工件的自动运输）；能解决多机床条件下工件的混流加工，且不用额外增加费用；具有优化调度管理功能，能实现无人化或少人化加工。

由于FMS将硬件、软件、数据库与信息集成在一起，融合了普通NC机床的灵活性和专用机床及刚性自动化系统的高效率、低成本，因而具有许多优点。

1）在计算机直接控制下实现产品的自动化制造，大大提高了加工精度和生产过程的可靠性。

2）使生产过程的控制和流程连续，并且达到最佳化，有效提高了生产效率。

3）实现系统内材料、刀具、机床、贮运、夹具以及测量检查站的理想配置，具有良好的柔性。

4）可直接调整物流（即工件流、工具流）和制造中的各项工序，制造不同品种的产品，大大提高了设备的利用率。

4.2　焊接柔性制造单元（WFMC）

WFMC是焊接柔性制造系统（WFMS）的核心组成部分，也是某些产品的独立作业系统，其代表为焊接机器人工作站。

按机器人工作方式的不同，焊接柔性制造单元（WFMC）有两种基本形式。

1）双机器人WFMC　在双机器人WFMC中，两台机器人中的一台为主机器人，另一台为从机器人，变位机为多工位变位机。工件的定位有两种方式，一是由操作者手工装卡工件，另一种是主、从机器人自动装卡工件。当完成工件的装卡后，控制系统检测变位机位置，主机器人控制变位机完成变位，这是焊接前的定位。焊接也存在两种方式，一种是两台机器人同时协同焊接，另一种是从机器人做装卡工作，主机器人焊接（见图5.5-12）。

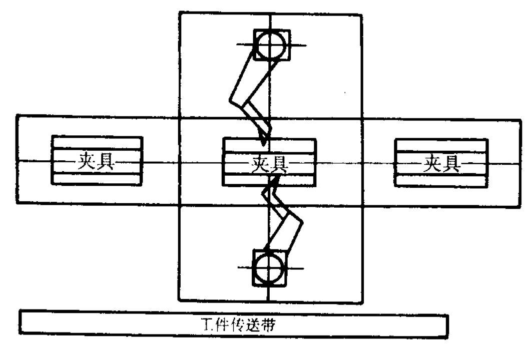


图5.5-12　双机器人WFMC

2）单机器人WFMC　由单个机器人和变位机组成。结构如图5.5-13。

由机器人控制器控制变位机精确定位和换位，协调变位机和机器人的动作以实现工件的自动焊接等各项功能。

此时，机器人控制器分为两级控制：工作站级和设备级。工作站级控制器是系统的主控制器；设备级包括机器人控制器和变位机控制器。主控制器通过机器人接口控制机器人的姿态调整和焊接过程，通过变位机接口进行变位，由位置检测传感系统精确定位。

焊接柔性化生产中，焊接夹具对焊接柔性影响非常大，夹具是否便于更换直接影响系统的柔性和生产效率。因此，为了真正实现高效率的多品种生产，焊接夹具不仅要保证工件定位准确，夹紧可靠，而且必须便于更换。

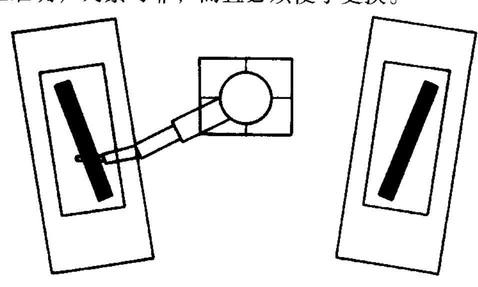


图5.5-13　单机器人WFMC

4.3　焊接柔性制造系统（WFMS）

焊接柔性制造系统（WFMS）的发展比较晚，它是在焊接机器人工作站日益成熟的基础上发展起来的，由多台焊接机器人工作站组成的系统，可以方便地实现多种不同类型工件的高效焊接加工，特别是在变换工件的适应性方面和生产过程的自动化方面充分显示其优越性。在欧美及日本等发达的国家，WFMS已普遍应用于焊接加工领域，其理论研究、软件开发及设备改造技术已相当成熟。

在我国，WFMS在汽车制造行业应用较为普遍。20世纪90年代初期，我国的工程机械制造行业也开始逐步应用这种先进技术来进行金属结构件的自动化焊接生产。起初制造行业的应用主要以点焊为主，是流水化焊接作业，技术较为成熟。

焊接柔性制造系统（WFMS）的主要优点如下：具备单个焊接机器人工作站所具有的一切优点，大都采用气体保护焊接工艺；进一步降低了工人的劳动强度，改善了工作环境；提高了生产效率，保证了长期有效地连续生产；缩短新产品的开发周期，减少响应设备的投资；可以适应多品种同时生产。

（1）焊接柔性制造系统（WFMS）的基本组成

1）典型焊接柔性制造系统（WFMS）的总体布局　典型的WFMS应由多个既相互独立又有一定联系的WFMC、运输系统、物料库、FMS控制器及安全装置组成，如图5.5-14所示。

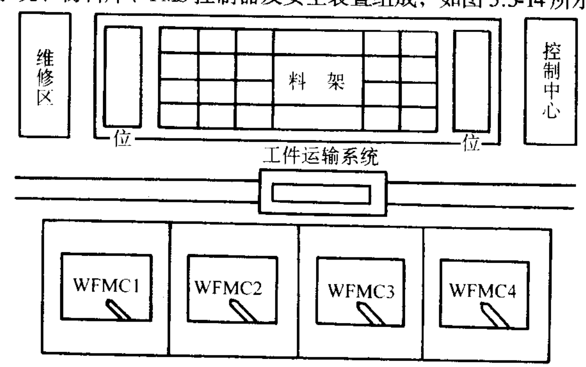


图5.5-14　WFMS的总体布局



每个WFMC可以独立编程和作业，一般情况下，分别独立完成对工件的焊接，特殊工艺条件下也可以按一定的工艺流程由几个WFMC进行流水化作业，完成对整个工件的焊接。工件运输系统实际上应包括运输小车和导轨。系统控制中心有各焊接单元的状态显示及运送小车、物料的状态信息显示。工作时将焊件放到上料架上，输送系统自动识别工件的类型，并将工件自动运送到相应的机器人焊接单元进行焊接。自动焊接完成后，小车自动将工件取出，运到下料架。

2）运输小车的构造及其功能　运输小车用于在FMS内部自动搬运工件。主要包括：纵向移动母车、横向移动子车；升降台及其液压系统、驱动控制系统。

母车仅用于实现运输系统的纵向移动并进行精确定位和位置锁定。其驱动装置中设有光电码盘进行位置检测，包括检测小车与各FMC、料架、导轨的相对位置。运输系统运动状态的改变通过设定码盘的不同初始值来实现，当反馈值与预置值一致时，母车停止运行，插销式机械锁定装置开始动作，当插销锁入地面固定的卡槽后，小车锁紧装置传感器反馈信息给控制中心，控制中心读取锁定信息后，驱动子车进入相关的FMC或料架进行工件的取送。其位置通过接近传感器确定。升降台通过液压升降系统满足工件装卸过程中在高度方向上的位置改变要求，其定位也是通过接近传感器确定。

3）储存工件及夹具的料架　在FMS中，料架是辅助设施，按照统一的形式设计和布置，方便工件及其夹具的储存和运输。其中至少在装料和卸料位置的料架上应安装传感器，分别用以确认待加工对象的类型。并确认卸料位置料架处于等待状态从而能保证不会因误操作而导致发生事故。

4）安全防护装置　在FMS中，通常从两个方面对整个系统进行防护：一是设备安全；另一个是人员安全。通常采用安全隔离墙、光栅、安全挡板和紧急停止按钮等。只有在故障彻底排除后，并确认退出故障，整个系统才能恢复正常工作。但是每个机器人工作站和运输系统又具有相对独立性，不会因为某个小范围的故障而影响其他设备的运行，此种防护装置的设置具有很强的灵活性。

（2）焊接柔性制造系统的生产特点及其基本要求

1）WFMS生产特点　WFMS是有计算机控制的具有高度柔性的可编程自动化焊接装置，其特点是：可靠性高，重复精度好，具有高度的柔性，可长时间作业，可提高产品质量和生产效率。尤其适合中小批量柔性化生产。

2）WFMS对工件要求

① 工件尺寸不宜过大。从理论上讲，WFMS可以适应对各种类型的工件进行自动化焊接，而事实上，任何FMS都是有针对性地设计制造的，机器人作业范围、变位机的最大负荷、运输系统的载重能力、夹具的使用范围都有一定的限制。为了便于装卡和运输，最大限度地提高FMS的生产效率，以FMS进行焊接的工件一般确定为中小型工件。

② 生产批量适中，品种变化多且结构复杂。采用WFMS的首选理由为：多品种工件的自动化焊接加工，提高生产效率，减少设备投资。如果每个品种的生产批量适中，那么FMS的优越性则会得到更好的体现。很显然，如果加工对象批量很大而品种又十分单一，采用专门的焊接设备更为合理。

③ 类型基本固定。FMS对系列化的品种类型比较适应，如果品种变化较多，而类型基本相似，只是尺寸上有一些差异，那么FMS进行焊接时则不需要因品种变化而进行夹具的调整，并且可以大大加快编程速度。

④ 产品设计时，在满足设计要求的前提下必须充分考虑机器人焊接要求：尽量采用角接接头，避免平对接及搭接接头；结构布置合理，焊缝尽可能连续；结构设计时应给机器人焊接预留足够的运动空间。

3）工艺要求　采用WFMS进行自动化生产，在焊接工艺方面也必须进行重新考虑，为了真正发挥先进设备的应有功效，全面提高生产效率和焊接质量，一般情况下应采用如下工艺顺序：钢板预处理（除锈、校平等）、高质量下料（数控冲剪、数控高能气体及等离子切割）、成形、部件拼装（部件焊接）、整体拼装、预焊接（定位焊、缝隙填充等）、柔性生产系统焊接、补焊（对无法实行自动化焊接的部位进行补焊）。

另外，工件的一致性要好，装配误差必须在限定的范围内；工件的定位精度要高，随机性不能超出要求范围；周边设备及工装应与机器人焊接相配套；生产工艺适合FMS作业；物流分配要均衡。

5　焊接机器人工程应用及其若干举例

5.1　焊接机器人工作站的一般设计原则

焊接机器人工作站的一般设计原则是：设计前必须充分分析作业对象，拟定最合理的作业工艺；必须满足作业的功能要求和环境条件；必须满足生产节拍要求；整体及各组成部分必须全部满足安全规范及标准；各设备及控制系统应具有故障显示及报警装置；便于维护修理；操作系统应简单明了，便于操作和人工干预；操作系统便于联网控制；工作站便于组线；经济实惠，快速投产等10项。这10项设计原则共同体现着工作站用户的多方面的需要，简单地说就是千方百计地满足用户的要求。下面只对更具特殊性的前四项原则进行讨论。

（1）作业顺序和工艺要求

对作业对象（工件）及其技术要求进行认真细致的分析，是整个设计的关键环节，它直接影响工作站的总体布局、机器人型号的选定、末端执行器和变位机等的结构以及其他周边机器的型号等方面。一般来说，工件的分析包含以下几个方面。

1）工件的形状决定了机器人末端执行器和夹具体的结构及其工件的定位基准。

2）工件的尺寸及精度对机器人工作站的使用性能有很大的影响。特别是精度，它决定了工件形状的一致性。设计人员应对与本工作站相关的关键尺寸和精度提出明确的要求。

3）当工件安装在夹具体上，或是放在某个搁置台上时，工件的质量和夹紧时的受力状况就成为夹具体、传动系统以及支架等零部件的强度和刚度设计计算的主要根据，也是选择电机或气液系统压力的主要因素之一。当工件需机器人抓取和搬运时，工件质量又成为选定机器人型号最直接的技术参数。

4）工件的材料和强度对工作站中夹具体的结构设计、选择动力形式、末端执行器的结构以及其他辅助设备的选择都有直接的影响。

5）工作环境也是机器人工作站设计中需要引起注意的一个方面。

6）作业要求是用户对设计人员提出的技术期望，它是可行性研究和系统设计的主要依据。具体内容有年产量、工作制度、生产方式、工作站占用空间、操作方式和自动化程度等。其中年产量、工作制度和生产方式是规划工作站的主要因素。

（2）工作站的功能要求和环境条件

机器人工作站的生产作业是由机器人连同它的末端执行器、夹具和变位机以及其他周边设备等具体完成的，其中起



主导作用的是机器人，所以这一设计原则首先在选择机器人时必须满足。满足作业的功能要求，具体到选择机器人时，可从三方面加以保证：有足够的持重能力，有足够大的工作空间和有足够多的自由度。满足环境条件可由机器人产品样本的推荐使用领域加以确定。

(3) 工作站对生产节拍的要求

生产节拍是指完成一个工件规定的处理作业内容所要求的时间，也就是用户规定的年产量对机器人工作站工作效率的要求。生产周期是机器人工作站完成一个工件规定的处理作业内容所需要的时间，也就是工作站完成一个工件规定的处理作业内容所需要花费的时间。在总体设计阶段，首先要根据计划年产量计算出生产节拍，然后对具体工件进行分析，计算各个处理动作的时间，确定出完成一个工件处理作业的生产周期。将生产周期与生产节拍进行比较，当生产周期小于生产节拍时，说明这个工作站可以完成预定的生产任务；当生产周期大于生产节拍时，说明一个工作站不具备完成预定生产任务的能力，这时就需要重新研究这个工作站的总体构思，或增加辅助装置，最大限度地发挥机器人的效率，使某些辅助工作时间与机器人的工作时间尽可能重合，缩短总的生产周期；或增加机器人数量，使多台机器人同时工作，缩短零件的处理周期；或改革处理作业的工艺过程，修改工艺参数。如果这些措施仍不能满足生产周期小于生产节拍的要求，就要增设相同的机器人工作站，以满足生产节拍。

(4) 安全规范及标准

在作机器人工作站安全防护设计时，应遵循以下两条原则：自动操作期间安全防护空间内无人；当安全防护空间内有人进行示教、程序验证等工作时，应消除危险或至少降低危险。

为了保证上述原则的实现，在工作站设计时，通常应该做到：设计足够大的安全防护空间，该空间的周围设置可靠的安全围栏，在机器人工作时，所有人员不能进入，围栏应设有安全连锁门，当该门开启时，工作站中的所有设备不能启动工作。

当人员必须在设备运动条件下进入防护区工作时，机器人及其周边设备必须在降速条件下启动运转，工作者附近的地方应设急停开关，围栏外应有监护人员，并随时可操纵急停开关。对用于有害介质或有害光环境下的工作站，应设置遮光板、罩或其他专用安全防护装置。机器人的所有周边设备必须分别符合各自的安全规范。

5.2 焊接机器人生产线的设计原则

机器人生产线的设计除了满足5.1节机器人工作站的设计原则外，还应遵循以下10项原则：各工作站必须具有相同或相近的生产周期；工作站间应有缓冲存储区；物流系统必须顺畅，避免交叉或回流；生产线要具有混流生产的能力；生产线要留有再改造的余地；夹具体要有一致的精度要求；各工作站的控制系统必须兼容；生产线布局合理占地面积力求最小；安全监控系统合理可靠；对于最关键的工作站或生产设备应有必要的替代储备。这里对前5项更具特殊性的原则进行说明。

(1) 各工作站的生产周期

机器人生产线是一个完整的产品生产体系。在总体设计中，要使得

$$T_1 \approx T_2 \approx T_3 \approx \cdots \approx T_n \leqslant T \qquad (5.5\text{-}13)$$

式中，$T_1 \sim T_n$ 为各工作站的生产周期，s/件；T 为生产线的生产节拍，s/件。

只有满足式（5.5-13）的要求，生产线才是有效的。对于那些生产周期与生产节拍非常接近的工作站要给予足够的重视，它往往是生产环节中的咽喉，也是故障多发地段，要有一些处理手段，使生产线正常运行，这里介绍4种处理原则。

1）分散作业内容原则。

2）重叠设立工作站原则。

3）拼合工序原则。

4）应急储备原则。

(2) 工作站间缓冲存储区（库）

在人工转运的物流状态下，虽然尽量使各工作站的周期接近或相等，但是总会存在站与站的周期相差较大的情形，这就必然造成各站的工作负荷不平衡和工件的堆积现象。因此要在周期差距较大的工作站（或作业内容复杂的关键工作站）间设立缓冲存储区，把生产速度较快的工作站所完成的工件暂存起来，通过定期地停止该站生产或增加较慢工作站生产班时的方式，处理堆积现象。

在含有机器人的柔性加工生产线中，被加工工件需要几次装夹，多次加工成形。机械加工机床分担着不同的加工工序，同一台机床也可能承担几道工序，分批量完成一道工序后，或更换工序、或转入下台机床，这就必须设立缓冲区，以便交替存取工件。

(3) 物流系统

物流系统是机器人生产线的大动脉，它的传输性、合理性和可靠性是维持生产线畅通无阻的基本条件。对于机械传动的刚性物流线，各工作站的工件必须同步移动，而且要求站距相等，这种物流系统在调试结束后，一般不易造成交叉和回流。但是对于人工装卸工件，或人工干预较多的非刚性物流线来说，人的搬运在物流系统中占了较大的比重，它不要求工件必须同步移动和工作站站距必须相等，但在各工作站的排布时，要把物流线作为一个重要内容加以研究。工作站的排布要以物流系统顺畅为原则，否则将会给操作和生产带来永久的麻烦。

(4) 生产线

混流生产就是在同一条生产线上，能够完成同类工件多型号多品种的生产作业，或只需做简单的设备备件变换和调整，就能迅速适应新型号工件的生产。这是机器人生产线设计的一项重要原则，也是难度较大和技术水平要求较高的一部分内容。它是衡量机器人生产线水平的一项重要指标，混流能力越强，则生产线的价值、使用效率及寿命就越高。混流生产的基本要求是工件夹具共用或可交换、末端执行器通用或可更换、工件品种识别准确无误、机器人控制程序分门别类和物流系统满足最大工件传送等内容。

(5) 生产线的再改造

工厂生产的产品应当随着市场需求的变化而变化，高新技术的进步和市场竞争也会促使企业引入新技术、改造旧工艺。而生产线又是投资相对较大的工程，因此要用发展的眼光对待生产线的总体设计和具体部件设计，为生产线留出再改造的余地。主要从以下几个方面加以考虑：预留工作站，整体更换某个部件；预测增设新装置和设备的空间；预留控制线点数和气路通道数；控制软件留出子程序接口等。

5.3 焊接机器人工作站举例

(1) HD—100型集箱管座焊接机器人工作站

HD—100型集箱管座焊接机器人工作站由哈尔滨工业大学于1997年研制成功，在东方锅炉厂服役。该工作站应用集箱范围大，管座净间距小，可焊接不同排列形式的管座。适用于如下范围。集箱尺寸：外径 ϕ219～ϕ650 mm，长度18 m，壁厚16～150 mm。管座尺寸：外径 ϕ32～ϕ76 mm，长度120 mm，壁厚3.5～12.7 mm。管座净间距最小40 mm。管座排列形式：规则排列、不规则排列、梅花形排列。材料：碳钢，耐热钢。



工作站总体上采用了移动式双机器人的结构形式，如图5.5-15所示。机械部分主要由直角坐标弧焊机器人、测量机器人、旋转定位机、机器人移动车、集箱支撑小车和走线架等部分组成。控制部分主要由机器人控制器和系统PLC控制器构成。其焊接部分主要由焊接电源、送丝机构、焊枪、焊枪清理装置等构成。

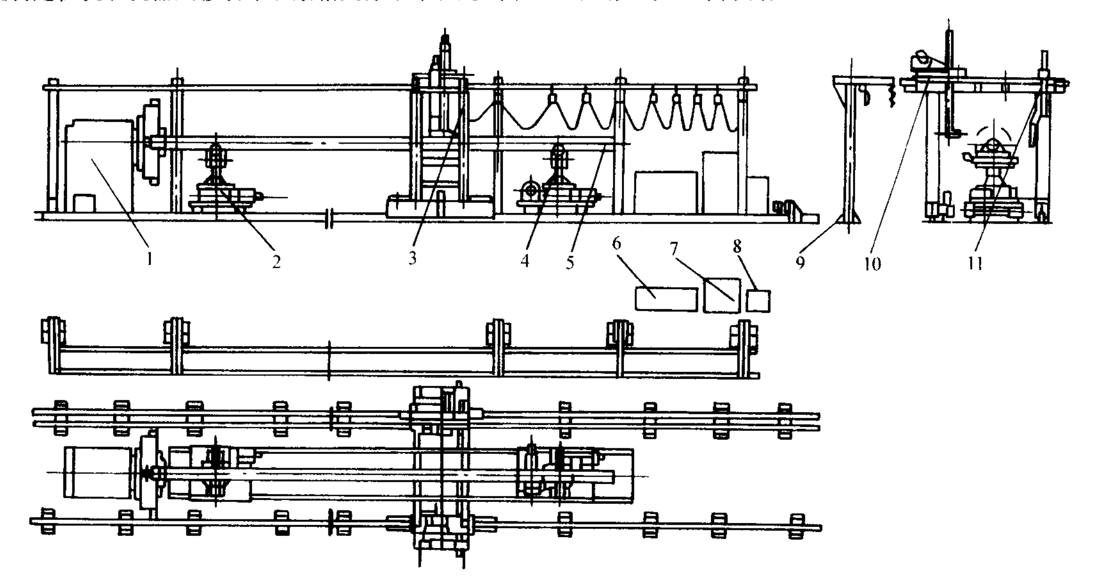


图5.5-15　HD—100型集箱管座焊接机器人工作站组成

1—旋转定位机；2—浮动支撑小车；3—移动车；4—支撑小车；5—集箱；
6—系统控制器；7—机器人控制器；8—焊接电源；9—走线架；10—焊接机器人；11—测量机器人

1）工作站主要机械结构

① 焊接机器人　焊接机器人操作机为6自由度直角坐标结构形式，吊挂在龙门架行走机构的一侧，6个轴均为AC伺服驱动，重复定位精度不大于0.2 mm。

② 测量机器人　测量机器人吊挂在龙门架行走机构的另一侧。由两自由度驱动台和自动测头组成。

③ 机器人移动车　机器人移动车是整个工作站的基础。其横梁左右两侧各吊挂焊接机器人和测量机器人并在其上运动，移动车沿集箱轴向运动。该移动车以24 m长的滚动导轨为基准，行程21 m，由AC伺服电机驱动谐波减速器带动齿轮齿条传动。

④ 支撑小车　小车共两台，用于支撑集箱（约重15 t）定位夹紧。其中一台靠近旋转定位机，无电动行走机构，靠人工在导轨上推行。当集箱较长需两台小车支撑时，集箱定位夹紧后该小车的滚轮应该下降离开集箱表面。另一台在导轨中部或尾部作为集箱另一支撑。在集箱定位夹紧后仍应支承集箱，它可由电动机驱动在导轨上行走。

当集箱直径变化时为保证集箱中心与旋转定位机中心重合，支撑车上的滚轮架由升降电动机调整滚子高度和调整两滚子之间的距离相配合来达到。

另外还有操作定位机、走线架。

安放弧焊机器人、测量机器人、移动车及焊枪所需电缆、电线。

2）工作站控制系统　由于本机器人工作站是一个多功能工作系统，因此采用分级控制结构。控制系统由焊接机器人控制器和工作站系统控制器两大部分构成，总体控制系统框图如图5.5-16所示。

① 焊接机器人控制器　由一个控制器和一个示教盒组成，486计算机是其主控机。该控制器可完成如下功能：6轴关节控制；6轴直角坐标控制；PTP、CP控制，直线、圆弧插补；根据示教3点所得圆轨迹可编程第2～5道焊缝轨迹；具有焊枪摆动功能；焊接参数（焊接电流、电压）的控制功能；实时接受测量机器人数据，修改焊缝空间位置和焊枪姿态的功能；具有存储和打印焊接参数的功能；具有故障报警和自诊断功能。

② 系统PLC控制器　PLC控制器用于控制机器人移动车行走机构、测量机器人、操作定位机、支撑小车等机器人工作站的所有外围设备的控制，并将测量机器人测出的管座位姿误差传送给焊接机器人控制器。

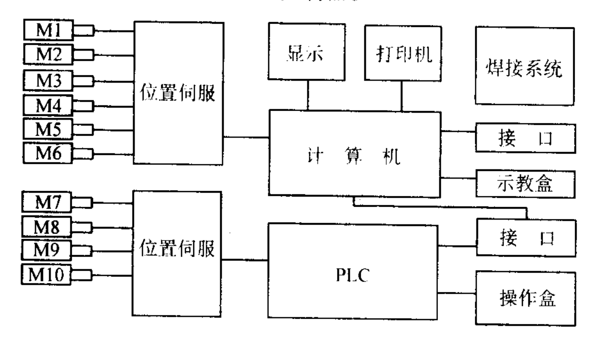


图5.5-16　工作站总体控制系统框图

3）焊接电源、焊接工艺、焊接方法　焊接电源为日本OTC公司的MM-350焊机，主要特点为一元化调节，即只要设定焊接电流，电弧电压将自动匹配，必要时只需微调即可。经过适当改装，主控计算机可通过接口电路进行控制。焊接方法为脉冲MAG焊。集箱尺寸：ϕ290 mm、壁厚40 mm。管座直径ϕ60 mm、壁厚5 mm，最小净间距40 mm。焊接参数：焊接电流130 A，电弧电压25 V，焊接速度4.5 mm/min，保护气流量14 L/min（CO_2 15%＋Ar85%）。

（2）摩托车减振器弧焊机器人工作站

1）摩托车减振器弧焊机器人工作站的整体化技术

① 摩托车减振器弧焊机器人工作站的组成　要使摩托车减振器弧焊机器人工作站能实现摩托车减振器部件的自动化焊接。就必须合理地对其组成进行优化设计、做到高性能低成本。结合生产的实际情况，根据TF—1弧焊机器人（中国兵器工业总公司第五八研究所生产）的功能和持点，进行组成研究，经过分析，决定在TF—1弧焊机器人的周围布置4个变位器。变位器和机器人在中央控制器控制下构成一整体，其组成如图5.5-17所示。



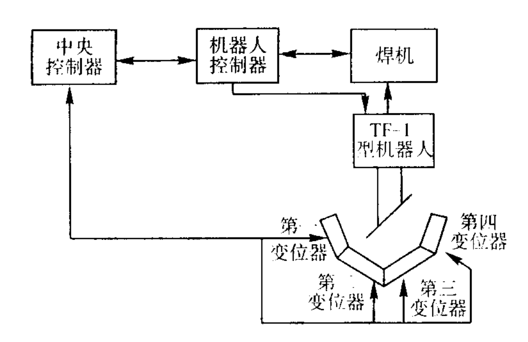


图 5.5-17　摩托车减震器弧焊机器人工作站组成示意图

② 摩托车减震器弧焊机器人工作站的整体化技术　摩托车减震器弧焊机器人工作站整体化控制框图如图 5.5-18 所示。由图 5.5-18 可知，在设定好第一变位器和第四变位器的焊接速度后，在四个变位器中的任意一个变位器上，人工上料完毕，按一下变位器上的启动按钮，中央控制器接收到这四个信号后、进行排序，本工作站就按序如图 5.5-18 所示工作过程进行，如第一变位器优先，则首先对该变位器的工件自动定位和夹紧，之后向机器人发运行命令，机器人就到引弧处，引弧成功后，机器人回答"开始焊接"信号，变位器在中央控制器控制下，按所设定的焊接速度使工件旋转，旋转一周，中央控制器就向机器人发"焊接结束"信号，机器人就收弧，之后返回等待状态。

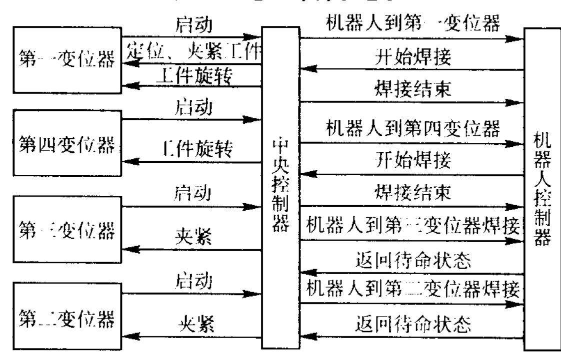


图 5.5-18　摩托车减震器弧焊机器人工作站整体化控制框图

依次类推、其余三个变位器也是按图 5.5-18 所示工作过程进行，这样在中央控制器控制下，机器人和变位器就构成了一整体。

2）摩托车减震器弧焊机器人工作站中央控制器

① 中央控制器的组成　由上所述，有了中央控制器才能使弧焊机器人和变位器构成一体，中央控制器还具有"设定"、"自动"功能，能使第一变位器和第四变位器按所设定的焊接速度旋转，同时还具有排序功能，为此，我们使用了工控机来完成，其框图如图 5.5-19 所示。

② 焊接速度控制　焊接电流、焊接电压和焊接速度是提高焊接效率和保证焊接质量相关的三大因素。当焊接电流、焊接电压设定后，可改变焊接速度，即焊件旋转角速度，我们采用步进电机进行控制，即调节步进电机的工作频率和旋转角度。

③ 摩托车减震器弧焊机器人工作站的可靠性和抗干扰措施　要使该弧焊机器人工作站投入生产实际应用，那它就必须具有很好的稳定性和可靠性，特采取了以下措施。

a）机器人控制柜使用双风道的密封机柜，中央控制器机柜使用单风道的密封机柜。

b）将控制柜外壳和所有的包塑金属软管与大地一点相接，其接地电阻小于 1 Ω。这样控制系统与大地不存在电容性耦合，也不存在机柜外壳上蓄积电荷使壳体电压升高的可能，所以安全。另外，控制柜接大地减少了干扰电压感应，

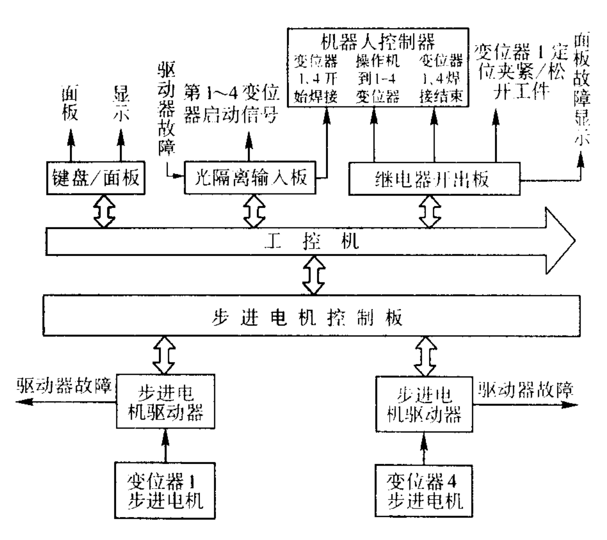


图 5.5-19　中央控制器框图

同时给机壳上感应的高频干扰电压提供了低阻的泄漏电路，因此提高了系统的抗干扰能力。

c）机器人控制器和中央控制器的强电系统都采用了隔离变压器、RC 灭弧器、压敏电阻、低通滤波器等措施，以提高系统的抗干扰能力。

d）在系统设计时，特别是功率元器件，进行了冗余设计。

e）对影响系统的稳定性、可靠性和精度的关键部件采用高性能的进口元器件。

f）在控制程序上采取了自保护、自诊断和容错技术。

g）所有 I/O 都采用光耦和继电器进行隔离，因而系统与外设在电路上完全隔离。

h）认真解决焊接中所存在的下述问题。防弧光，为了避免在焊接时电弧弧光对操作人员的伤害，在两变位器之间设置弧光防护扳；使用质量好的 ϕ1.2 mm 的 H08Mn2SiA 焊丝；使用纯度≥99.8%的 CO_2 气体，并排除气体中的水分。

3）摩托车减震器弧焊机器人工作站的变位器　摩托车贮液筒和前叉立管都是薄壁焊件（厚 1 mm），焊接外观质量要求是：焊宽 6 mm，正面余高 1.5 mm，无焊穿、无焊瘤，但要求焊透，要达到这样要求，既要有合理的焊接工艺参数，又要求焊枪导电嘴到工件等距。

① 第一变位器　第一变位器实现摩托车贮液筒环焊缝的焊接，要保证焊接质量，对于本工位的变位器来讲其主要功能为：人工上料后能自动定位和夹紧，能按所设定的焊接速度恒速旋转，要实现焊枪导电嘴到焊件等距，即要求变位器的同轴度小于 ϕ0.1 mm。

根据以上要求，变位器由工作平台、头座箱、尾座三部分组成。考虑到大批量生产，其变位器应既灵巧，又要有足够的刚性，并有良好的人机匹配。

头座箱由步进电机、谐波减速器和主轴组成，尾座由顶尖和气缸组成，头座箱传动如图 5.5-20 所示。

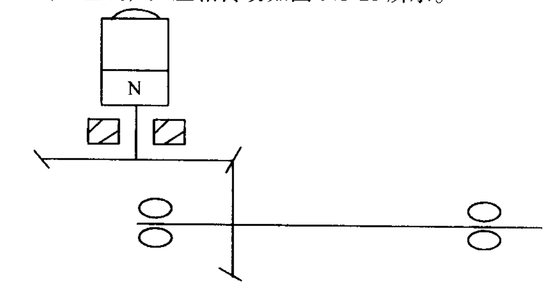


图 5.5-20　头座箱传动示意图

要达到同轴度小于 ϕ0.1 mm 的技术指标，首先得保证主轴的跳动，其技术措施是：步进电机通过谐波减速器经锥齿轮啮合驱动主轴，主轴安装孔在设计及制造时应达到同轴度小于 ϕ0.05 mm 的技术要求，并使尾座顶尖的中心高度达到主轴箱中心高尺寸的精度。设置尾座微调机构，可调节左右偏摆以满足主轴箱的同轴度小于 ϕ0.05 mm。

该变位器在中央控制器控制下，将工件自动定位和夹紧，且按所设定的焊接速度旋转。

② 第二变位器和第三变位器　采用定位孔定位和气动夹紧的方法。

③ 第四变位器　第四变位器实现摩托车前叉立管与前叉连接板端面环焊缝的焊接，连接板与立管为紧配合且连接板的重量大，要求焊接焊件立放于工位上，并在手动夹紧工件后使工件能按焊接速度恒速旋转，还要实现旋转焊件至焊枪导电嘴等距，即要求旋转工件的焊缝坡口圆跳动小于 ϕ0.1 mm。

根据以上要求，变位器为平台式工作台，工人从平台上上下料。平台下部由步进电机经谐波减速器驱动焊件旋转，工件下端内孔定位，上端手动调节夹紧工件。变位器既有足够的刚件又便于装夹。焊缝圆跳动小于 ϕ0.1 mm 的保证由驱动套安装两主轴孔的同轴度小于 ϕ0.05 mm 和两定位滑块中心与驱动套间的同轴度小于 ϕ0.05 mm 共同实现。

该变位器在中央控制器控制下，使焊件按设定的焊接速度旋转。

4）摩托车减震器弧焊机器人工作站焊接工艺优选研究　要保证焊接质量，除了焊接电源、TF—1 型弧焊机器人和变仪器要有好的性能外，还必须要有合适的焊接工艺规范，即合理选择：干长、气体流量、焊接速度、焊接电流和焊接电压。为此分别对第一变位器到第四变位器的焊接方法和焊接工艺进行了试验。

5.4　焊接机器人生产线举例

(1) 汽车座椅骨架焊接机器人生产线

1）工件分析

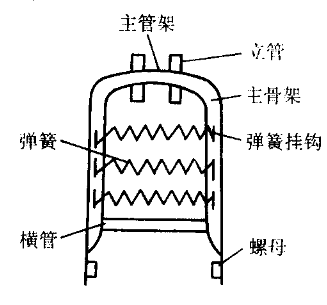


图 5.5-21　工件形状

这条生产线生产的座椅骨架如图 5.5-21 所示，工件主要由主管架、横管、立管、弹簧挂钩、螺母和弹簧等 17 个散件构成。除弹簧是拉伸后挂在骨架上外，主骨架上的其余散件均是采用点焊或弧焊焊接而成的，本生产线可完成 8 种型号座椅骨架的生产，每种型号又分为左右座椅，即 16 种工件要在生产线上进行"混流"生产（同一产品的多规格生产）。生产线的生产节拍为 22 s。工件状况如表 5.5-7 所示。

表 5.5-7　工件状况参数

工件名称	汽车座椅骨架
成品质量/kg	约 1.5
外形尺寸/mm	750 × 450 × 100
工件种类	8 种 × 2（左/右）
散件数量/个	17
生产节拍/s	22

2）生产线总体构成　汽车座椅骨架焊接生产线的总体布置如图 5.5-22 所示，圈内的数字表示工作站的编号，其余符号及主要设置配置见表 5.5-8。生产线由 30 个工作站组成，分别完成座椅骨架散件的拼合、点焊、弧焊和安装靠背弹簧等一系列作业。由另外一条数控弯管加工生产线完成的主骨架散件从图 5.5-22 左端的第 7 站入线；第 1 站由人工操作，预置拼合某些散件；第 7 站中的机器人从数控弯管线的末端取出主骨架，在 D—2 点焊机上点焊螺母，然后将主骨架装在本线的随行夹具上；第 10 站中的机器人从 D—3—1 和 D—3—2 中取出弹簧挂钩，将它们逐一装在主骨架上，由第 12 站中的机器人进行点焊；第 14 ~ 16 站和第 18 站是骨架弧焊工作站；第 28 站的机器人从线上取出已焊工件，将它放在焊接成品定位暂置台 D—11 上，然后从 D—8 和 D—9 弹簧库中分别取出 3 根靠背弹簧，装在骨架焊接成品上，最后由 D—11 中的搬出机构将成品送出本线。以上是使用了机器人工作站的生产线。另外，第 6 站是横管散件自动供给工作站，利用专用装置从横管库中取出横管，放置在随行夹具板上；第 9 站是工件夹紧工作站，将随行夹具板上预置的散件夹紧定位，以便后序的机器人焊接；第 17 站和第 20 站是随行夹具板翻转工作站，使第 18 站的机器人能够焊接随行夹具板背面的焊缝；第 26 站是工件松夹工作站，松开已焊工件，便于第 28 站的机器人取出。除上述工作站外，其他站屑于辅助性工作站，有的是识别工作种类；有的是变换夹具板流动方向；有的是清扫、处理夹具扳；有的只是为满足总体布置而设的"空站"。

图 5.5-22　汽车座椅骨架焊接生产线的总体布置图



表 5.5-8　工作站的主要设备及装置

站号	作业名称	装置编号	装置名称及其他
1	拼合散件	人工	立管和上管架
6	供给散件	D—1	横管自动供给装置
7	供给主骨架	R—1	K30S 型搬运机器人
	点焊螺母	D—2	螺母供给装置及点焊机
9	夹紧工件	D—3	夹具夹紧装置
10	供给散件	R—2	K30S 型搬运机器人
		D—3—1	弹簧挂钩供给装置
		D—3—2	弹簧挂钩供给装置
12	点焊	R—3	L60S 点焊机器人
14	弧焊	R—4	K10S 弧焊机器人
15	弧焊	R—5	K10S 弧焊机器人
16	弧焊	R—6	K10S 弧焊机器人
17	翻转夹具板	D—5	随行夹具板翻转装置（0°～180°）
18	弧焊	R—7	K10S 弧焊机器人
20	翻转夹具板	D—6	随行夹具板翻转装置（180°～0°）
26	松开工件	D—7	工件夹紧机构的松开装置
28	取出工件	D—10	顶起工件装置
		R—8	L60S 搬运工件及装配弹簧机器人
	装配弹簧	D—8，D—9	弹簧库
		D—11	焊成品定位暂置台装置
29	清扫夹具板	D—12	空气清扫装置
30	防黏液喷涂	D—13	焊渣防黏液喷涂装置
物流系统		D—14	随行夹具板传送线

3）主要技术介绍　这条生产线是一个庞大的机电一体化系统，主要采用气压驱动方式（个别地方用电动机驱动），由计算机和可编程控制器分层控制。限于篇幅，这里略去电控及气控系统，仅简要介绍与总体设计关系较为密切的一些关键技术。

① 物流系统　物流系统是机器人生产线的重要组成部分，担负着各工作站之间工件的转运、定位、夹紧以及工件或散件的入线和出线等工作。正是物流系统将各个独立的工作站单元连接起来，成为一条流动的生产系统。本文介绍的这条生产线的物流系统属循环式链条传送型，如图 5.5-23 所示，它由 8 个独立的链传动组成，工件及散件装在一块随行夹具板上，30 块夹具板（每站各一块）放在由链条驱动的支撑滚轮上，周而复始地按图示箭头方向循环，形成封闭的物流系统，各站均有随行夹具板的定位机构，使各板能准确地停留在各站的固定位置上，这种物流形式对夹具板间的精度一致性要求较高。

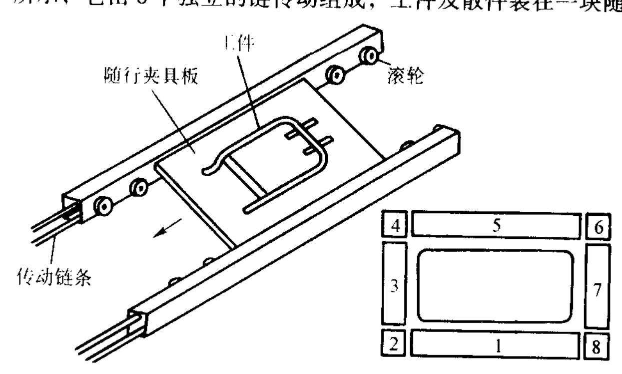


图 5.5-23　汽车座椅骨架焊接生产线物流系统

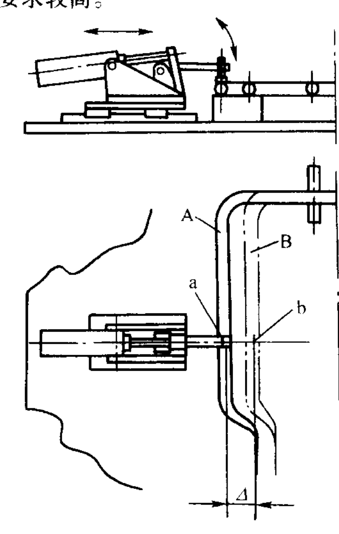


图 5.5-24　夹具板移动变换工件品种

② 随行夹具板　本例的座椅骨架共有 8 个品种，每种分成左右位，共有 16 种工件，通过作图分析，找出各种工件的公共点，确定夹紧位置，实现了在同一随行夹具板上共同定位的要求，其中两处在更换品种后，需要使夹紧点移动一个距离，适应品种的外形要求，如图 5.5-24 所示。A 工件与 B 工件在夹持点位置上相差 Δ，夹持点分别设计在 a 和 b 处，夹具体下方安装了滑轨及限位挡块，当 A 工件入线时，夹具体在气缸驱动下退后，夹住 a 点；当更换 B 工件时，夹具体向前移动 Δ 距离后夹住 b 点。另外夹具板在有焊缝处开出适当大小的口子，当焊接背面焊缝时，由生产线的翻转装置将夹具板翻转 180°，以便焊枪伸至焊缝处。

③ 工件识别　座椅骨架生产线上品种的识别，是在随行夹具板上安装一组可调试触头，每个触头有伸出和缩回两个位置，每个工作站都在随行夹具板定位的相应位置处，安装 4 个接近传感器。按照每个触头的位置和每个传感器有无信号的状态，共有 16 种排列，以此区分 16 个工件品种。

④ 弹簧装配末端执行器　第 28 站的 L60S 搬运工件及装配弹簧机器人的作用，一是从生产线上取出已焊工件，放在暂置台上；二是从弹簧库中取出三根长度不等的弹簧，装在已焊骨架上。由于品种多，动作数量多，因此这是一种相当复杂的专用末端执行器。它共使用了 19 个气缸驱动，主要有抓取工件的夹爪，抓取弹簧的 6 个手爪，拉伸弹簧的 6 个气缸和变换品种的 3 个气缸。总质量为 58.5 kg。

（2）日本大发轿车车身焊接机器人生产线

下面对日本大发的轿车车身总成柔性焊接生产线，从工艺设备、生产线、夹具等方面作一介绍。

1）车身总成柔性焊接线的工艺设计　车身总成柔性焊接线的年生产能力为 15 万辆，生产节拍 1.6 min，共有 11 个工位，29 台焊接机器人，占地 462 m^2。该生产线常年生产 3 种车型，并可生产各种车型，换型不停产。

该生产线各工位的工序及焊接机器人数量见表 5.5-9。

该生产线全部采用机器人焊接。机器人及其焊接系统是可以任意按焊点编程的，因而产品换型时只需对机器人及其焊接系统重新编程，即可适应新产品的焊接需要。

2）车身总成柔性焊接线所采用的夹具及生产线型式

该柔性焊接线的输送系统采用日本大福公司的地面电动单轨输送系统。该输送系统见图 5.5-25。



表 5.5-9 工艺过程

工序号	工序内容	设备数量
第 1 工位	准备工位 根据上位机指令某一车型的电动车自动到位	
第 2 工位	自动装配地板分总成	
第 3 工位	自动装配侧围分总成，焊接	4 台焊接机器人
第 4 工位	补焊	3 台焊接机器人
第 5 工位	小件装配、焊接	4 台焊接机器人
第 6 工位	小件装配、焊接	4 台焊接机器人
第 7 工位	补焊	4 台焊接机器人
第 8 工位	补焊	2 台焊接机器人
第 9 工位	补焊	4 台焊接机器人
第 10 工位	补焊	4 台焊接机器人
第 11 工位	车身总成下线工位	

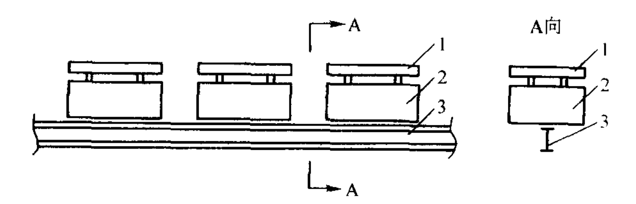


图 5.5-25 日本大福公司的地面电动单轨输送系统

1—夹具托盘；2—电动车；3—电动车轨道

夹具托盘由夹具和输送夹具的托盘组成。夹具托盘内装有程序逻辑控制器（PLC），可识别车型信息，并加以判断控制，并且可以把车型信息传递给机器人焊接系统，指导机器人按给定的车型信息选择程序进行焊接。从这种意义上讲，夹具托盘也可称为智能夹具托盘。

电动车主要由车本体、行走机构、控制系统组成。其工作原理是：电动车通过电梳，从与轨道一同铺设的安全滑触线上取得电能，通过安装在电动车上的驱动电机、减速机、行走轮沿轨道运行。

地面电动单轨输送系统，其单车最大承载质量为 2 000 kg，速度范围在 3 ~ 100 m/min 之间，电动车停止精度 ± 5 mm，带有附加定位装置的电动车停止精度为 ± 0.3 mm。

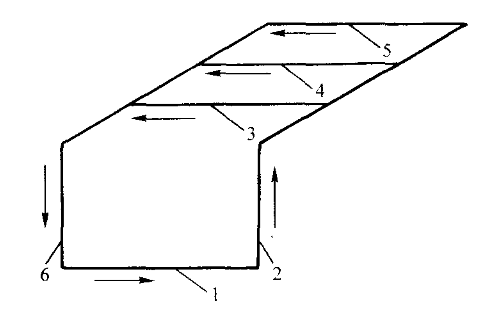


图 5.5-26 车身总成柔性焊接线的输送方式

1—焊接生产线；2—电动车升起段；3—A 型车夹具托盘库；4—B 型车夹具托盘库；5—C 型车夹具托盘库；6—电动车下降段

该柔性焊接线的输送方式，如图 5.5-26。

在焊接生产线这一工作段，电动车（包括地板夹具托盘）逐序完成工艺内容后，通过轨道升降机升起，进入相应车型的夹具托盘库。夹具托盘库共有三条线，每条线用于存放某一车型的地板夹具托盘，该柔性线可用于三种车型的焊接生产。根据上位机指令，某一车型的电动车通过轨道升降机下降至焊接生产线第一工位，进入新的一轮工作循环。

车身总成焊接夹具的结构型式见图 5.5-27。

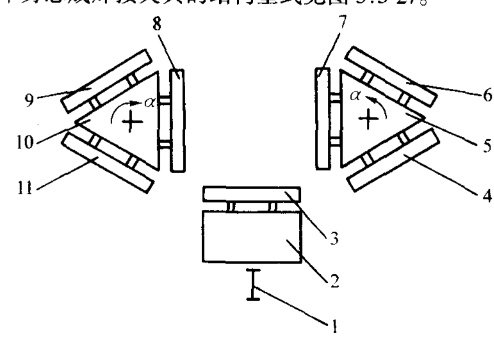


图 5.5-27 车身总成焊接夹具的结构型式

1—电动车轨道；2—电动车；3—地板夹具托盘；4—C 型车右侧围夹具托盘；5—三面转动体；6—B 型车右侧围夹具托盘；7—A 型车右侧围夹具托盘；8—A 型车左侧围夹具托盘；9—B 型车左侧围夹具托盘；10—三面转动体；11—C 型车左侧围夹具托盘

左/右侧围采用三面转动机构，转动轴平行于线体运行方向，每转动 120°，就可以得到某一车型的侧围夹具。

车身总成焊接夹具，实质上是电动车上的地板夹具、三面转动体上的左/右侧转夹具一定方式的组合。当电动车上的地板夹具为某一车型时，其车型信息自动传送到三面转动体上，三面转动体如图示 α 方向绕转动轴转动一定角度（120°或 240°），在其内侧面出现同一车型的左/右侧围夹具。地板夹具、左/右侧围夹具共同组成某一车型车身总成。

编写：焦向东（北京石油化工学院）
王中辉（北京石油化工学院）



参考文献

1 中国焊接协会辅助设备与器具专业委员会．蓬勃发展的我国焊接辅助设备与器具制造行业．中国机械工程学会焊接学会四十周年中国焊接协会十五周年纪念文集，北京，2002．11

2 王彬．我国焊接自动化技术的现状与发展趋势．电焊机，Vol．31，2001（6）

3 佟欣．焊接自动化技术的开发．焊接技术，2000，29（6）

4 韩勤．从焊接辅助装置在气体保护焊中的应用看我国焊接自动化的发展．焊接，2000（10）

5 陈强等．弧焊技术发展现状．高效化焊接国际论坛论文集，北京．2002．11

6 陈善本等．焊接智能化技术现状与发展．第十次全国焊接会议论文集（第一册）．黑龙江人民出版社．2001．9

7 林尚杨．我国机械制造业中焊接机器人的应用现状及发展趋势．第八次全国焊接会议论文集（第一册）．北京．机械工业出版社，1997

8 林尚杨等．焊接机器人及其应用．机械工业出版社．2000．7

9 吴林等．我国焊接行业现状及发展趋势．第八次全国焊接会议论文集（第一册）．北京．机械工业出版社，1997

10 薛振奎等．我国油气管道和焊接技术．焊接，2002（11）

11 常兴等．我国长输管道下向焊技术的现状及发展趋势．焊接．2001（11）

12 郭云曾．焊接机器人及系统介绍．焊接技术．焊接技术，2000，29（增刊）：

13 周业基．我国造船高效焊接与自动化的发展．焊接技术，2000，29（增刊）：

14 李宪政．长输管线高效焊接技术及焊机特点．焊接技术，2000，29（增刊）：

15 陈丙森等．计算机辅助焊接技术．北京．机械工业出版社，1999

16 杨守全．储罐自动焊设备及应用技术的现状与发展．化工建设工程，2001（1）

17 欧向东，段光兴．自动焊在大型储罐建设中的应用．化工建设工程，2002（5）

18 程家富等．自动焊接设备及技术在立式储罐制造中的应用．石油工程建设，2002（1）

19 高泽涛等．意大利PWT－CWS．02NRT管道焊接专机的应用．焊接技术，2002．12．Vol31 增刊

20 张占辉等．自动焊技术在长输管道焊接中的应用．焊接技术．2001．12．Vol．30 增刊

21 刘守龙等．长输管道全位置自动焊接技术．焊接技术．2000．29（增刊）

22 万军等．机器人在集箱管接头焊接制造中的应用．焊接，2001（11）

23 岳宏等．基于结构光的焊缝跟踪系统的研究．河北工业大学学报．1999．28（4）

24 陈念、孙振国、陈强．基于视觉图像全位置精密TIG焊焊缝跟踪．焊接学报．2001．22（4）

25 Wang Q．L，etal．Arc light sensing of droplet transfer and its analysis in pulsed GMAW process．Quarterly Journal of Transactions of Japan Welding Society．1997．15（3）

26 高进强等．熔池图像传感与几何参数检测．焊接技术．1999．（4）

27 R．Kovacevle，Y．M．Zhang．Neurofuzzy model－based predicfive weld fucsion state estimation．IEEE 1997，0272－1708/97

28 中国机械工程学会焊接学会编著．焊接手册（第二版）第一卷．焊接方法及设备．北京：机械工业出版社．2001

29 潘际銮．现代弧焊控制．北京：机械工业出版社．2000．

30 稚禄等．接触式二维跟踪技术的研究与应用．焊接．1991（8）

31 王惠民．光学仪器信号转换技术．北京：北京理工大学出版社，1993．

32 蒋力培，焦向东，薛龙，李明利．球罐高效自动焊关键技术研究．机械工程学报，2003．8

33 郭勇，帅业等．CJY6421D汽车后桥壳自动焊接设备的研制．电焊机，Vol．31，2001（5）

34 王李铁，曲家祺．执行电动机．机械工业出版社，1997

35 张忠厚，刘丽，刘强．大直径超薄壁长筒体纵环缝自动焊接装置的研制．焊接，1998（8）

36 赵波，孙奇．抽油机驴头圆弧主焊缝焊接专机的研制．焊接，2000（12）

37 杨国栋，张乃键，高艺松等．罐体自动焊设备研究及新型探臂焊车研制．电焊机，Vol．312001（2）

38 谭蓉．全位置自动焊焊枪移动和摆动机构的设计．焊接技术，2001（6）

39 于海生等．微型计算机控制技术．清华大学出版社．1999．3

40 蒋力培．翅片管自动电弧焊成套设备的研究．第八次全国焊接会议论文集．1997．9．北京

41 蒋力培，曹建树，付小梅．单片微型计算机实用教程．北京石油化工学院．2002

42 田瑞庭．可编程序控制器应用技术．机械工业出版社．1994．7

43 侯天奎等．筒体环缝MAG焊接自动机．焊接，2002（11）

44 吴敢生，张丽，任继武，汪本刚．单片机控制鞍形焊缝自动跟踪系统的设计．焊接技术，1999（2）

45 胡旭东．外焊缝自动跟踪系统．焊管，1998（6）

46 俞建荣，蒋力培．CO_2焊机一元化智能控制系统．焊接学报．2001（3）

47 徐平，李金灿．电控及自动化设备可靠性工程技术．机械工业出版社．1997

48 Nomura H．Narrow gap welding process with high speed rotating arc．IIW Doc．XII－C－033－82

49 潘际銮．空心轴电机驱动的旋转扫描焊炬．中国专利，No．922444765

50 吴世德．电弧传感器焊缝跟踪德信息处理技术．［博士学位论文］．北京：清华大学，1997

51 刘丹军等．视觉机器人MAG焊接参数的在线规划系统，焊接学报，1997，18（1）：50～54．

52 肖强．焊接机器人视觉系统，焊接，1999（4）：7～10

53 P．Kim et al．Automatic teaching of welding robot for free－

formed seam using laser sensor, Optics & Laser Technology, 1999, 31: 173~182.
54 J. S. Kim et al. A robust method for vision – based seam tracking in robotic arc welding. IEEE 1995, 0–7803–2722–5/95: 363~368.
55 高进强等. 熔池图像传感与几何参数检测. 焊接技术, 1999, (4): 3~4.
56 R. Kovacevic, Y. M. Zhang. Neurofuzzy model – based predictive weld fusion state estimation. IEEE 1997, 0272–1708/97: 30~41.
57 赵冬斌. 基于三维视觉传感的填丝脉冲 GTAW 熔池现状动态智能控制. [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.
58 孔文德. 短路过渡焊接熔池形状检测的研究. [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 1998.
59 曹一鹏等. CO_2 短路过渡焊接熔池图像传感器. 焊接学报. 2004 年 4 月, 25 (2): 1–4
60 曹一鹏. 机器人弧焊焊缝成形的视觉检测. [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2003
61 D. Farson et al. Infrared measurement of base metal temperature in gas tungsten arc welding. Welding Journal, 1998, 77 (9): 396s~401s.
62 陈念等. 基于视觉图像全位置精密 TIG 焊焊缝跟踪. 焊接学报, 2001 年 8 月 V22 (4): 19–22
63 Sun ZG. et al. Realizing precision pulse TIG welding with arc length control and visual image sensor based weld detection. China welding, May, 2003, V12 (1): 11–16
64 赵熹华. 焊接方法与机电一体化. 北京: 机械工业出版社, 2001
65 许纪倩等. 工件位置变换机类型及结构. 机械制造. 2001, 39 (3): 40~42
66 王政. 焊接工装夹具及变位机械—性能、设计、选用. 北京: 机械工业出版社, 2001
67 吴林等. 智能化焊接技术. 北京: 国防工业出版社, 2000
68 孔宇. 弧焊机器人无碰路径规划. 第八次全国焊接会议论文集. 1997: 3—648~3—650
69 崔鲲. 冗余自由度弧焊机器人路径自主规划的优化控制. 焊接学报. 1998, 19 (3): 190~194
70 刘飞等. CIMS 制造自动化. 北京: 机械工业出版社, 1997
71 徐杜等. 柔性制造系统原理与实践. 北京: 机械工业出版社, 2001
72 余达太等. 工业机器人应用工程. 北京: 冶金工业出版社, 1999
73 李瑞峰等. 集箱管座焊接机器人工作站的研究. 高技术通讯. 1997, 7 (6): 40~43
74 骆远福等. 摩托车减震器弧焊机器人焊接工作站. 机器人. 2000, 22 (7): 842~846
75 许纪倩等. 汽车座椅骨架机器人生产线. 组合机床与自动化加工技术. 2000, (11): 39~41
76 阎功杰. 日本大发轿车车身柔性焊接线. 世界汽车. 1997, (11): 15~16
77 陈强等. 焊接信息视觉传感. 第十届全国焊接会议 – IT 之夜论文集
78 陈强等. 计算机视觉传感技术在焊接中的应用. 焊接学报, 2001, 22 (1): 83–90
79 顾文郁编译. 现代光电测试技术. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1993.
80 米宝. 机械扫描式 PSD 视觉传感及其焊缝跟踪系统的研究. [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 1996.
81 王天亚. 多功能无盲区 Laser – PSD 扫描式焊缝自动跟踪系统的研究. [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 1999.
82 张甲英. 球罐纵缝焊接自动跟踪系统及熔宽实时检测的研究. [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1997.
83 马颂德等. 计算机视觉 – 计算理论与算法基础. 北京: 科学出版社. 1998.
84 金建敏. 弧焊机器人焊接路径预规划的研究. [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1996.
85 路井荣. 弧焊机器人焊炬姿态优化的研究. [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1999.
86 岳宏等. 基于结构光焊缝跟踪系统的研究. 河北工业大学学报, 1999, 28 (4): 21~24
87 钱在中主编, 焊接技术手册, 山西科学技术出版社, 1999 年 3 月
88 陈祝年主编, 焊接工程师手册, 机械工业出版社, 2002
89 Welding Handbook (9th edition), Vol. 1., American Welding Society, 2001
90 H. K. Tonshoff, I. Inasaki, Sensors in Manifacturing. Wiley – VCH Verlag GmbH, 2001
91 张华. 焊接温度场实时检测及其应用. [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1997
92 殷树言, 徐鲁宁, 丁京柱. 熔焊极气体保护焊的高效化研究. 焊接技术, 2000, 29 (12): 4~7
93 陈剑虹. 汽车连接新工艺 – 54 届国际焊接年会综述 (2). 焊接, 2000, (4): 5~7
94 Zhang, Y. M.; Pan, C.; Male, A. T. Improved microstructure and properties of 6061 aluminum alloy weldments using a double – sided arc welding process. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 2000, 31 (10): 2537–2543
95 陈剑虹. 汽车连接新工艺 – 54 届国际焊接年会综述 (1). 焊接, 2000, (4): 5~9
96 赵春英. 复合 YAG 激光焊接电极头. 焊接, 2000, (4): 4
97 杨春利. 发展中的活性化焊接技术. 第三届计算机在焊接中的应用技术交流会论文集, 中国上海, 2000 年 11 月, 298~303
98 潘际銮等. 焊接过程的模糊控制, 机械工程学报, 31 卷, 1996, 2
99 孙久文. 小孔型等离子焊接穿透力的研究及应用, [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2001
100 林三宝等. GTAW 熔池谐振法熔透控制技术. 焊接, 1999, (7): 12~14
101 高向东等. GTAW 神经网络 – 模糊控制技术的研究. 焊接学报, 2000, 21 (1): 5~8
102 宋永伦等. 机器人弧焊过程焊缝质量信息的在线判读. 焊接技术, 2000, 29 (增刊): 15~17
103 蔡艳等. 人工神经网络在 CO_2 短路过渡焊质量评估中的应用. 焊接技术, 2001, 30 (6): 7~9
104 武传松等. Kohonen 神经网络在熔化极气体保护焊接质量监测中的应用. 无损检测. 2002, 24 (4): 159~161
105 赵熹华主编. 焊接检验. 北京: 机械工业出版社. 1992
106 孙忠诚等. 焊缝 X 射线探伤实时成像自动评片系统的研究. 第七届全国焊接学术会议论文集 (3). 1993, 126~130
107 吴文楷. 短路过渡 CO_2 焊接熔滴控制. [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2000


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET



第 6 篇

焊 接 结 构 设 计

主 编 陈祝年

编 写 陈祝年

审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET



第1章　焊接结构设计的原则与方法

1　焊接结构的特点

用焊接方法制造的结构称焊接结构。它与铆钉、螺栓连接的结构相比较，或者与铸造、锻造方法制造的结构相比较，具有下列特点，这些特点在设计焊接结构时必须充分考虑。

1）焊接接头强度高　铆钉或螺栓结构的接头，需预先在母材上钻孔，因而削弱了接头的工作截面，其接头的强度低于母材，低20%左右。而现代的焊接技术已经能做到焊接接头的强度等于甚至高于母材的强度。

2）焊接结构设计的灵活性大

① 焊接结构的几何形状不受限制　铆接、铸造和锻造等无法制造的空心封闭结构，用焊接方法制造并不困难。

② 结构的壁厚不受限制　被焊接的两构件，其厚度可厚可薄，而且厚与薄相差很大的两构件也能相互焊接。

③ 结构的外形尺寸不受限制　任何大型的金属结构，可以按起重运输条件允许的尺寸范围，把它划分成若干部件，分别制造，然后吊运到现场组装焊成整体。铸造或锻造结构受工艺和设备条件限制，外形尺寸不能做得很大。

④ 可以充分利用轧制型材组焊成所需要的结构　这些轧制型材可以是标准的，也可以按需要设计成专用（非标准）的，这样的结构质量轻、焊缝少。

⑤ 可以和其他工艺方法联合制造　如设计成铸－焊、锻－焊、栓－焊、冲压－焊接等联合的金属结构。

⑥ 异种金属材料可以焊接　在一个结构上，可以按需要在不同部位配置不同性能的金属材料，然后把它们焊接成一个实用的整体，以充分发挥材料的各自性能，做到物尽其用。

3）焊接接头密封性好　焊缝处的气密性能和液密性能是其他连接方法无法比拟的。特别在高温、高压容器的结构上，只有焊接才是最理想的连接形式。

4）焊前准备工作简单　近年数控精密切割设备的发展，对于各种厚度或形状复杂的待焊件，不必预先划线就能直接从板料上切割出来，一般不再机械加工就能投入装配和焊接。

5）结构的变更与改型快，而且容易　铸造需预先制作模样（木模）与铸型，锻压需制作模子等，生产周期长、成本高。而焊接结构可根据市场需求，能很快改变设计或者转产别的类型焊接产品，并不因此而增加很多投资。

6）最适于制作大型或重型的、结构简单的而且是单件小批量生产的产品结构　由于受设备容量的限制，铸造与锻造制作大型金属结构困难，甚至不可能。对于焊接结构来说，结构越大越简单就更能发挥它的优越性。但是，当构件小、形状复杂，而且是大批量生产的产品，从技术和经济上就不一定比铸造或锻造结构优越。但是，随着焊接机器人的应用与发展，以及柔性制造系统的建立，焊接结构的这种劣势也将改变。如果在结构设计上能使焊缝有规则地布置，就很容易实现高效率的机械化和自动化的焊接生产。

7）成品率高　一旦出现焊接缺陷，修复容易，很少产生废品。

8）产生焊接变形和应力　焊接是一种局部加热过程，焊后焊缝区的收缩将引起结构的各种变形和残余应力，这对结构的工作性能发生一定影响。如焊接应力可能导致裂纹；残余应力对结构强度和尺寸稳定性不利；超过允许范围的焊接变形会增加矫正或机械加工的工作量，使制造成本增加等。

9）对应力集中敏感　焊接结构具有整体性，其刚性大，对应力集中较为敏感。应力集中点是结构疲劳破坏和脆性断裂的起源。因此，在焊接结构设计时，要避免或减少产生应力集中的一切因素，如处理好断面变化处的过渡；保证结构具有施焊的良好条件，不致因焊接困难而产生焊接缺陷等。

10）焊接接头上性能不均匀　焊缝金属是母材和填充金属在焊接热作用下熔合而成的铸造组织，靠近焊缝金属的母材，受到焊接热的影响而发生组织变化，结果在整个焊接区出现了化学成分、金相组织、物理性质和力学性能不同于母材的情况。因此，在选择母材和焊接材料，以及制订焊接工艺时，应保证接头处的性能符合产品的技术要求。

以上第1）～7）点是焊接结构的优点，设计时应充分利用和发挥，而第8）～10）点是焊接结构容易出现的问题，必须十分重视和认真对待。按目前的焊接技术发展水平，这些问题是可以克服和解决的。

2　焊接结构设计的基本要求和基本原则

2.1　设计的基本要求

设计任何焊接结构都应满足下列基本要求。

1）实用性　结构必须达到所要求的使用功能和预期效果。

2）可靠性　结构在使用期内必须安全可靠，应能满足强度、刚度、稳定、抗振、耐蚀等方面的要求。

3）工艺性　应该是能焊接施工的结构。所选的金属材料既有良好的焊接性能，又具有良好的焊前预加工性能和焊后热处理性能；所设计的结构应具有焊接和检验的可达性，并易于实现机械化和自动化焊接。

4）经济性　制造该结构时所消耗的原材料、能源和工时应最少，其综合成本低。

此外，还要适当注意结构的造型美观。

上述要求是设计者追求的目标，设计时要统筹兼顾，应以可靠性为前提，实用性为核心，工艺性和经济性为制约条件。

2.2　设计的基本原则

为了使设计能达到上述的基本要求，设计焊接结构时，应遵循下列的设计原则。

（1）合理选择和利用材料

所选用的金属材料必须同时满足使用性能和加工性能的要求，前者包括强度、韧度、耐磨、耐蚀、抗蠕变等性能；后者主要是焊接性能，其次是其他冷、热加工性能，如热切割、冷弯、热弯、金属切削及热处理等性能。

在结构上有特殊性能要求的部位，可采用特种金属材料，其余采用能满足一般要求的廉价材料。如有防腐蚀要求的结构，可采用以普通碳钢为基体，以不锈钢为工作面的复合钢板或者在基体上堆焊抗蚀层；又如有耐磨要求的构件，仅在工作面上堆焊耐磨合金或热喷涂耐磨层等。充分发挥异种金属材料能进行焊接的特点。

尽可能选用轧制的标准型材和异型材。通常轧制型材表面光洁平整、质量均匀可靠；使用时不仅减少许多备料工作量，还可减少焊缝数量。由于焊接量减少，焊接变形易于控



制。

在划分结构的零部件时，要考虑到备料过程中合理排料的可能性，以减少余料，提高材料利用率。

（2）合理设计结构形式

能满足上述基本要求的结构形式都被认为是合理的结构设计，也就是可从实用、可靠、可加工和经济等方面对结构设计的合理性进行综合评价。设计时，一般应注意以下几点。

1）根据强度、刚度和稳定的要求，以最理想的受力状态去确定结构的几何形状和尺寸。切忌仿效铆接、铸造、锻造结构的构造形式。

2）既要重视结构的整体设计，也要重视结构的细部处理。这是因为焊接结构属刚性连接的结构，结构的整体性意味着任何部位的构造都同等重要，许多焊接结构的破坏事故起源于局部构造设计不合理处。对于应力复杂或应力集中部位更要慎重处理，如结构中的结点、断面变化部位、焊接接头的焊趾处等。

3）要有利于实现机械化和自动化焊接。为此，应尽量采用简单、平直的结构形式；减少短而不规则的焊缝；一条焊缝上其截面应相同；要避免采用难以弯制或冲压的具有复杂空间曲面的结构；尽量减少施焊时的翻身次数；组装时，定位和夹紧应方便。

（3）减少焊接量

除了前述尽量多选用轧制型材减少焊缝外，还可以利用冲压件代替部分焊件；结构形状复杂，角焊缝多且密集的部位，可用铸钢件代替；肋板的焊缝数量多工作量大，必要时可以适当增加基体壁厚，以减少或不用肋板；对于角焊缝，在保证强度要求的前提下，尽可能用最小的焊脚尺寸，因为焊缝面积与焊脚高的平方成正比；对于坡口焊缝，在保证焊透的前提下应选用填充金属量最少的坡口形式。

（4）合理布置焊缝

有对称轴的焊接结构，焊缝宜对称地布置，或接近对称轴处，这有利于控制焊接变形；要避免焊缝汇交和密集；在结构上有焊缝汇交时，使重要焊缝连续，让次要焊缝中断，这有利于重要焊缝实现自动焊，保证其质量；尽可能使焊缝避开高工作应力部位、应力集中处、机械加工面和需变质处理的表面等。

（5）施工方便

必须使结构上每条焊缝都能方便施焊和质量检验。如，焊缝周围要留有足够焊接和质量检验的操作空间；尽量使焊缝都能在工厂中焊接，减少在工地的焊接量；减少手工焊接量，增大自动焊接量；对双面焊缝，操作方便的一面用大坡口，施焊条件差的一面用小坡口，必要时，改用单面焊双面成形的接头坡口形式和焊接工艺；尽量减少仰焊或立焊的焊缝，仰焊或立焊的焊接劳动条件差，不易保证质量，且生产率低。

（6）有利于生产组织与管理

经验证明，大型焊接结构采用部件组装的生产方式有利于工厂的组织管理。因此，设计大型焊接结构时，要进行合理分段。分段时，一般要综合考虑起重运输条件、焊接变形控制、焊后热处理、机械加工、质量检验和总装配等因素。

3 焊接结构设计的基本方法

在我国机械工业中，新产品设计的基本程序一般包括决策、设计、试制、定型生产和持续改进五个阶段。在设计阶段中，对大型复杂的产品设计，一般又分初步设计、技术设计和工作图设计三个工作程序。这里仅介绍焊接结构在技术设计阶段中用以确定结构形状和尺寸的基本设计方法。

工程的设计与计算方法随科学技术的发展而发展，从简单到复杂，从低水平到高水平，从手工设计到计算机自动设计，其设计速度和设计质量随着设计方法的改进和完善而不断提高。从发展角度来分，设计方法有传统设计法和现代设计法两大类。焊接结构设计目前大量采用的仍然是传统设计法，如许用应力设计法或安全系数设计法；大型或重要的焊接结构设计逐渐采用现代设计方法中的可靠性设计法。

3.1 许用应力设计法

许用应力设计法又称安全系数设计法。它是以满足工作能力为基本要求的一种设计方法，对于一般用途的构件，设计时需满足的强度条件或刚度条件分别为：

工作应力≤许用应力

工作变形≤许用变形

或者

$$安全系数=\frac{失效应力}{工作应力}\geqslant 许用安全系数$$

这里的失效应力，如果为屈服准则，则为材料的屈服点；如果是断裂准则，则为强度极限，在疲劳设计中为疲劳极限。

对于含裂纹构件的强度设计，除要满足上述常规的强度条件外，还要同时满足断裂力学的强度条件。其安全系数与无裂纹构件抗断设计的安全系数有类似的表达式，但含义不同，见表6.1-1。

表6.1-1 含裂纹构件抗断设计的安全系数与强度条件

适用范围	断裂判据	安全系数	强度条件	附注
线弹性体	$K_I = K_{Ic}$	$n_k = \frac{K_{Ic}}{K_I}$	$n_k \geqslant [n]_k$	K_I—I型裂纹的应力强度因子 K_{Ic}—材料的平面应变断裂韧度 n_k—以断裂韧度为基准的安全系数 $[n]_k$—以断裂韧度为基准的许用安全系数
弹塑性体	$\delta = \delta_c$	$n_\delta = \frac{\delta_c}{\delta}$	$n_\delta \geqslant [n]_\delta$	δ—裂纹尖端张开位移 δ_c—材料裂纹尖端张开位移的临界值 n_δ—以裂纹尖端张开位移为基准的安全系数 $[n]_\delta$—以裂纹尖端张开位移为基准的许用安全系数
用裂纹尺寸表示	$a = a_c$	$n_a = \frac{a_c}{a}$	$n_a \geqslant [n]_a$	a—无损探伤估计的构件的裂纹尺寸 a_c—发生断裂时的裂纹临界尺寸 n_a—以裂纹临界尺寸为基准的安全系数 $[n]_a$—以裂纹临界尺寸为基准的许用安全系数

许用应力、许用变形和许用安全系数等，一般由国家工程主管部门根据安全和经济的原则，按材料的强度、载荷、环境、加工质量、计算精度和构件的重要性等加以确定。其中许用应力是考虑了各种影响因素后经过适当修正的材料失效应力除以许用安全系数来确定的。

我国在锅炉和压力容器、起重机、铁路车辆、船舶等行业中都在各自设计规范内规定了各种材料的许用应力、许用变形或许用安全系数值。可以直接查用。

工作应力或工作变形一般是采用工程力学的理论和方法进行计算，重要而复杂的结构可以采用有限单元法等进行分析和计算，以获得更为精确的结果。通常是求出结构上应力或应变最大的部位及其数值。当理论分析和计算有困难时，可以用模型试验等方法测定。模型试验也被用来验证计算的结果。

通常，形状复杂的构件受载后，截面的大部分产生基本应力，截面突变处出现峰值应力（应力集中）。前者对强度起主导作用，后者起局部作用，两者总称一次应力。不是由载荷引起的应力称二次应力或次应力，如残余应力。基本应力、峰值应力和残余应力对不同材料的强度影响不同，应区别对待。对塑性金属材料，在静载下，峰值应力产生局部塑性变形后应力重新分布，故峰值应力对静强度影响不大。但在循环载荷下构件常在峰值应力处首先出现疲劳裂纹而导致破坏，故在疲劳强度设计中不能忽视峰值应力的影响。残余应力对塑性金属材料的静载强度一般没有影响。但是，当材料变脆或塑性变形受到限制时，峰值应力和残余应力都对强度有很大的影响，必须在设计和制造上降低峰值应力和残余应力。

如果发现设计不满足强度或刚度要求，如工作应力大于许用应力时，必须修改结构，可以是改变结构形状或尺寸以降低工作应力；也可以是改变结构材料或选用确保质量的加工法和检测方法等，以提高许用应力，直到满足要求为止。重要的结构或结构中的重要部位，有时需要做 1:1 的实物试验及寿命试验，来检验设计结果的正确性。

上述许用应力设计法所用的参量，如载荷、强度、几何尺寸等都看成是确定量，故又称为定值设计法。这种设计法所用的表达式简单明了，使用方便，已经沿用了很长时间，积累的资料和数据完整，故至今仍在许多工程设计中采用。但这种设计法中所用的许用应力或安全系数是根据设计经验来确定的，不够科学；而且，设计与计算用的参量，如载荷、强度等实际上都是随机变量，存在不确定性。为了保证设计安全可靠，往往选取较低的许用应力或较高的安全系数，因而导致结构尺寸大，耗料多而不经济。

3.2　可靠性设计法

可靠性设计法是现代设计方法之一，在机械工程中可靠性设计是保证机械及零部件满足给定的可靠性指标的一种机械设计方法。与上述常规的定值设计法不同，可靠性设计法把与设计有关的载荷、强度、尺寸和寿命等数据如实地当作随机变量，运用概率理论和数理统计的方法进行处理，因而其设计结果更符合实际，做到既安全可靠而又经济。因此，对重要机械或要求质量轻、可靠性高的构件都应采用这种设计方法。

但是，可靠性设计在一般工程中应用的历史不长，设计所需的呈分布状态的各种数据，有的还需试验、采集和积累。在我国，建筑行业结构件的设计中除疲劳强度计算外已采用了以概率理论为基础的极限状态设计方法，并制订有供设计用的统一标准和相应的规范，见 GB50009，GB50017，GB50068。在机械行业中应用还不广泛。这里简要介绍机械结构可靠性设计中的可靠度及其计算方法。

3.2.1　可靠度及其计算

可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。当使用“概率”来度量这一能力时，就是可靠度。可靠度是时间的函数，常记为 $R(t)$，因它是一个概率，故其取值范围是

$$0 \leqslant R(t) \leqslant 1 \qquad (6.1\text{-}1)$$

结构在规定条件下和规定时间内丧失规定功能的概率称不可靠度，或称失效概率，也是时间的函数，常记为 $F(t)$。因失效与不失效是互相对立事件，按概率互补定理，两者有如下关系：

$$R(t) = 1 - F(t) \qquad (6.1\text{-}2)$$

因此，可以用 $R(t)$ 或 $F(t)$ 来度量结构的可靠性。

在简单的设计场合，如果以 C 代表结构抗力（如强度、刚度、断裂韧度等）；以 S 代表载荷对结构的综合效应（如应力、应变、变形等），而且它们都是服从于一定分布的随机变量，则结构的功能函数 Z 为：

$$Z = C - S \qquad (6.1\text{-}3)$$

当 $Z\begin{cases} >0 & \text{结构处于可靠状态} \\ =0 & \text{结构处于极限状态} \\ <0 & \text{结构处于失效状态} \end{cases}$

当结构抗力 C 和载荷效应 S 为任意分布时，用 $f(C)$ 和 $f(S)$ 分别表示结构抗力和载荷效应的概率密度函数，可靠度被定义为结构抗力大于载荷效应的概率，即

$$\begin{aligned} R(t) &= P(C-S) \\ &= P(C-S>0) \\ &= P(C-S>1) \end{aligned} \qquad (6.1\text{-}4)$$

式中，t 为工作时间；P 为概率；C 为结构抗力；S 为载荷效应；R 为可靠度。

图 6.1-1 表示载荷效应－结构抗力分布与时间的关系，当 $t=0$ 时，两个分布之间有一定的安全裕度，不会发生失效。但随时间推移，由于材料和环境等因素，结构抗力下降，结果在时间达某 t 时，结构抗力分布和载荷效应发生干涉（图中影线所示），这时将产生失效。

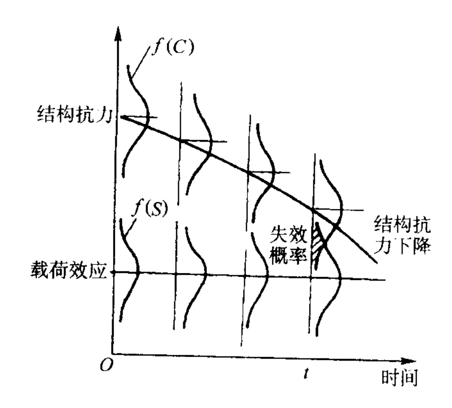


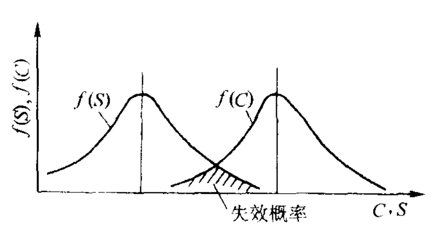
图 6.1-1　载荷效应－结构抗力分布与时间的关系

对时间为 t 时的载荷效应－结构抗力分布干涉模型（图 6.1-2）进行分析，当结构抗力 C 大于载荷效应 S 时，不会发生失效，这时结构可靠度 R 的表达式为

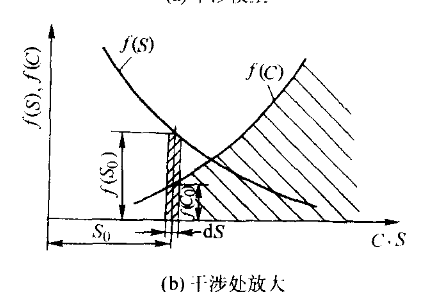
$$R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(S)\left[\int_{S}^{\infty} f(C)\mathrm{d}C\right]\mathrm{d}S \qquad (6.1\text{-}5)$$

由上式可知，在知道结构抗力和载荷效应的分布密度函数后，即可求得结构的可靠度。在这里结构抗力可以是静强度、疲劳强度、断裂韧度或其他的材料抗力指标；而载荷效应，则可以是静应力、交变应力、应力强度因子或其他形式的外作用参数。例如，当研究的是含裂纹构件的可靠性时，则 $C = K_{\mathrm{Ic}}$，$S = K_{\mathrm{I}}$，这时的可靠度为

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f(K_1)\left[\int_{K_1}^{\infty} f(K_{1c})\mathrm{d}K_{1c}\right]\mathrm{d}K_1$$



(a) 干涉模型



(b) 干涉处放大

图 6.1-2　时间为 t 时的载荷效应－结构抗力分布的干涉

当结构抗力 C 载荷效应 S 为正态分布时，可靠度按下式计算：

$$R(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\beta}^{\infty} -\frac{1}{2}u^2\mathrm{d}u \tag{6.1-6}$$

式中，u 为标准正态变量，$u=(x-\mu)\sigma$，μ 为均值，σ 为标准差；β 为联结系数，又称可靠性指数，由各分布参数按下式确定：

$$\beta = \frac{\mu_c - \mu_s}{\sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_s^2}} \tag{6.1-7}$$

式中，μ_c、μ_s 分别为结构抗力和载荷效应的数学期望（即均值），根据样本数据 c_i、s_i 分别按下式计算

$$\mu_c = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} c_i \tag{6.1-8}$$

$$\mu_s = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} s_i \tag{6.1-9}$$

σ_c、σ_s 分别为结构抗力和载荷效应的均方差（标准差），根据样本数据 c_i、s_i 分别按下式计算

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(c_i - \mu_c)^2} \tag{6.1-10}$$

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(s_i - \mu_s)^2} \tag{6.1-11}$$

式（6.1-7）叫联结方程，通过可靠性指数 β 把结构抗力和载荷效应与可靠度 R 联系起来了，它成为构件可靠性设计的重要公式。

从式（6.1-6）看出 β 和 R 有一一对应关系，可从标准正态分布表中查到，表 6.1-2 列出常用部分。β 越大可靠度 R 越高。当所设计的结构其结构抗力和载荷效应已知时，可通过式（6.1-8）～式（6.1-11）计算出 μ_c、μ_s、σ_c、σ_s 等分布参数，再按式（6.1-7）求出可靠性指数 β，最后查表 6.1-2，即求得该设计的可靠度 R。把它与规定的可靠度目标值比较，若大于或等于可靠度目标值，则该设计可以接受。否则需调整设计参数，使之满足为止。

表 6.1-2　可靠性指数 β 与可靠度 R 的对应关系

β	1.0	1.5	2.0	2.5
R	0.841 3	0.933 2	0.977 2	0.993 8
β	3.0	3.5	4.0	4.5
R	0.998 7	0.999 77	0.999 968	0.999 997

3.2.2　可靠性强度设计的一般程序

利用联结方程式（6.1-7）可以根据不同计算准则进行结构可靠性强度的设计与计算。如果结构的材料强度和几何尺寸已知，如前所述，就可以求得结构的可靠度。图 6.1-3 示出结构可靠性设计程序框图。

如果设计时，先给定目标可靠度或目标可靠性系数 [β]（这时称可靠性指标），则根据已知结构的材料强度可求其几何尺寸；或者，根据已知结构的几何尺寸可选择所需材料。这里所给定的可靠性指标 [β]，一般应根据各种结构的重要性、破坏性质和失效后果以优化方法确定。

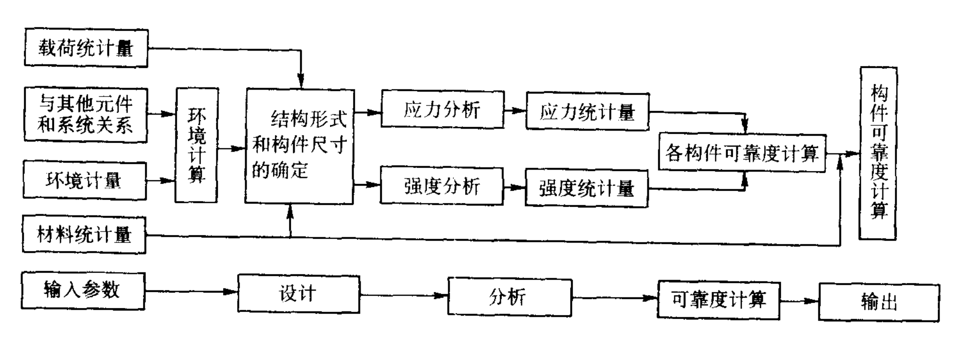


图 6.1-3　结构可靠性强度设计程序

3.2.3　建筑钢结构的极限状态设计法

这是可靠性设计法在我国建筑结构设计中的具体应用。

（1）主要规定

《建筑结构可靠度设计统一标准》（GB 50068—2001）规定：结构的可靠度采用以概率理论为基础的极限状态设计方法分析确定。结构的极限状态系指结构或构件能满足设计规定的某一功能要求的临界状态，超过这一状态结构或构件便不再满足设计要求；计算结构可靠度对一般的工业与民用建筑物规定的设计使用年限为 50 年，根据结构破坏可能产生的后果划分 3 个安全等级，见表 6.1-3。

表 6.1-3　建筑结构的安全等级

安全等级	破坏后果	建筑物类型
一级	很严重	重要的工业与民用建筑物
二级	严重	一般的工业与民用建筑物
三级	不严重	次要的建筑物

对承重的结构要按承载能力极限状态和正常使用极限状态设计。承载能力极限状态为结构或构件达到最大承载能力



或达到不适于继续承载的变形时的极限状态，按此极限状态设计时，应考虑载荷效应的基本组合，必要时还应考虑载荷效应的偶然组合；正常使用极限状态为结构或构件达到正常使用的某项规定限值时的极限状态，按此极限状态设计时，应考虑载荷的标准组合、频遇组合和准永久组合。

为了应用简便并符合人们长期以来的习惯，规定设计表达式要根据各种极限状态的设计要求，采用有关的载荷代表值、材料性能标准值、几何参数标准值以及各种分项系数来表达。这些分项系数应根据结构功能函数的基本变量的统计参数和概率分布类型以及按表 6.1-4 中规定结构构件的可靠性指标［β］，通过计算分析并考虑工程经验确定。

有关载荷的设计值和标准值应按《建筑结构载荷规范》(GB 50009) 的规定采用。

表 6.1-4　建筑结构构件极限状态设计时采用的可靠性指标［β］

破坏类型	安全等级		
	一级	二级	三级
延性破坏	3.7	3.2	2.7
脆性破坏	4.2	3.7	3.2

(2) 钢结构设计表达式

按《钢结构设计规范》(GB 50017—2003) 规定，工业与民用房屋和一般构筑物的钢结构设计，除疲劳强度计算外，应采用以概率理论为基础的极限状态设计法，并用分项系数的设计表达式进行计算。下面是钢结构构件或连接按不同极限状态设计的表达式。

1) 按承载能力极限状态设计　对于承载能力极限状态，结构或构件应采用载荷效应的基本组合和偶然组合进行设计。

当采用载荷效应的基本组合（即只考虑永久载荷和可变载荷组合）时，其设计表达式取下列各式的最不利者。

① 由可变载荷效应控制的组合

$$\gamma_0 = (\gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q1} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^{n} \gamma_{Qi} \Psi_{ci} S_{Qik}) \leqslant R_k/\gamma_R$$

式中，γ_0 为结构重要性系数，对安全等级为一级、二级、三级的结构件，分别取 1.1，1.0，0.9；γ_G 为永载荷的分项系数，当其效应对结构不利时，由可变载荷效应控制的组合取 1.2；由永久载荷效应控制的组合取 1.35。当其效应对结构有利时，取 1；γ_{Qi} 为第 i 个可变载荷的分项系数，其中 γ_{Q1} 为可变载荷 Q_1 的分项系数，一般情况取 1.4；S_{Gk} 为按永久载荷标准值 G_k 计算的载荷效应值；S_{Q1k} 为在基本组合中起控制作用的一个可变载荷效应标准值；S_{Qik} 为按可变载荷标准值 Q_{ik} 计算的载荷效应值，其中 S_{Qik} 为诸可变载荷效应中起控制作用者；Ψ_{ci} 为可变载荷 Q_i 的组合值系数，其值不应大于 1；n 为参与组合的可变载荷数。R_k/γ_R 为抗力设计值。其中 R_k 为抗力标准值，γ_R 为抗力分项系数。为了简化，用于钢结构强度计算时把 R_k/γ_R 表示为 $f_y/\gamma_R = f$。f 为所用材料的强度设计值，可按表 6.1-9 和表 6.1-10 来选定。

② 由永久载荷效应控制的组合

$$\gamma_0(\gamma_G S_{Gk} + \sum_{i=1}^{n} \gamma_{Qi} \Psi_{ci} S_{Qik}) \leqslant R_k/\gamma_R$$

③ 对于一般排架、框架结构，可以采用简化的极限状态设计表达式

$$\gamma_0(\gamma_G S_{Gk} + \Psi \sum_{i=1}^{n} \gamma_{Qi} S_{Qik}) \leqslant R_k/\gamma_R$$

式中，Ψ 为载荷组合系数，一般情况取 0.9，当只有一个可变载荷时，取 1。

当采用载荷效应的偶然组合时，一般只考虑一种偶然作用与其他载荷的组合，在极限状态设计表达式中，偶然作用的代表值不乘以分项系数，与偶然作用同时出现的可变载荷，应当根据观察资料和工程经验采用适当的代表值。

2) 按正常使用极限状态设计　对于正常使用极限状态，结构或构件应根据不同的设计要求采用载荷效应的标准组合、频遇组合和准永久组合，并按下列设计表达式进行设计。

$$S \leqslant C$$

式中，S 为荷载效应组合的设计值；C 为结构构件达到正常使用要求的规定限值，例如变形、裂缝、振幅、加速度、应力等的限值，应按各有关建筑结构设计规范的规定采用。

① 标准组合

$$S = S_{Gk} + S_{Q1k} + \sum_{i=2}^{n} \Psi_{ci} S_{Qik}$$

② 频遇组合

$$S = S_{Gk} + \Psi_{f1} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^{n} \Psi_{Qi} S_{Qik}$$

③ 准永久组合

$$S = S_{Gk} + \sum_{i=2}^{n} \Psi_{Qi} S_{Qik}$$

式中，$\Psi_{f1} S_{Q1k}$ 为在频遇组合中起控制作用的一个可变载荷频遇值效应；$\Psi_{Qi} S_{Qik}$ 为第 i 个可变载荷准永久值效应。

在钢结构设计中，使用最多的是标准组合，这时的载荷效应 S 常指结构由载荷标准值所产生的变形，如挠度等。因而 C 代表设计规范中所规定的各种变形容许值，受弯件的容许挠度值按表 6.1-11 来确定，柱的容许变形值按表 6.1-12 来选定。

3.3　许用应力、安全系数和强度设计值

3.3.1　许用应力和安全系数

(1) 母材的许用应力和安全系数

在传统的强度设计中，为了构件能安全可靠地工作，不致发生断裂或产生过大的变形，必须使构件的实际工作应力小于或等于许用应力。

许用应力是构件工作时，允许的最大应力值。在静载条件下，焊接结构中母材的许用应力是根据材料的极限强度除以安全系数确定。即

$$[\sigma] = \frac{\sigma_c}{n_c}$$

式中，［σ］为许用应力；σ_c 为材料的极限强度（对于塑性材料为屈服点 σ_s 或屈服强度 $\sigma_{0.2}$，对于脆性材料为抗拉强度 σ_b）；n_c 为安全系数。

确定安全系数需考虑下列因素。

1) 载荷的性质以及它的确定性　如载荷是否恒定，在工作过程中是否有超载或冲击等情况。

2) 材料的质量　是否均质，其强度的分散性如何。

3) 构件的重要性　如发生破坏可能造成伤亡事故、设备事故或停工损失的严重程度。

4) 环境条件对强度的影响　如低温、腐蚀、磨损等。

5) 应力分析与计算的精确程度。

6) 制造工艺质量对构件强度的影响。

我国在压力容器、起重机、铁路桥梁、船舶等工业部门的设计规范或规程中，都明确规定有在本行业范围内金属结构设计用的安全系数或由它确定的许用应力值。设计时，直接按规定选用。例如，钢制压力容器设计用的母材安全系数按 GB 150—1998 规定选用，见本篇第 7 章表 6.7-2；起重机金属结构设计用的母材安全系数和许用应力按 GB 3811—1983 规定选用。

如果设计某金属构件时，没有相应的设计规范或规程可遵循，则安全系数的取值范围可参考表 6.1-5。



表 6.1-5 机械设计中安全系数取值范围

序	适用场合	安全系数
1	可靠性很强的材料，如中低强度高韧性结构钢，强度分散性小，载荷恒定，设计时以减轻结构质量为主要出发点时	1.25 ~ 1.5
2	常用的塑性材料，在稳定的环境和载荷下工作的构件	1.5 ~ 2.0
3	一般质量的材料，在通常的环境和能够确定的载荷下工作的构件	2.0 ~ 2.5
4	较少经过试验的材料或脆性材料，在通常环境和载荷下工作的构件	2.5 ~ 3.5
5	未经试验，因而其强度不确定的材料以及环境和载荷不确定情况下工作的构件	3 ~ 4

(2) 焊缝的许用应力

对焊接结构中的焊缝强度计算，使用的是焊缝许用应力。焊缝许用应力与焊接工艺方法、焊接材料和焊接检验的精确程度有关。

用电弧焊焊接一般结构钢时，通常要求选用与母材具有相同或相近强度等级的焊接材料进行焊接。因此，确定焊缝许用应力方法之一是按母材的许用应力乘以一个系数，该系数根据影响焊缝质量和可靠程度而取不同的值，其范围不大于1。对于熔透的对接焊缝，经质量检验符合设计要求，系数可取1。这意味着焊缝的许用应力与母材相同，该焊缝可不进行强度验算。

一般机器焊接结构的焊缝许用应力可按表 6.1-6 中选用。

表 6.1-6 一般机器焊接结构的焊缝许用应力

焊缝种类	应力状态	焊缝许用应力	
		一般 E43 及 E50 系列焊条电弧焊	低氢型焊条电弧焊、自动焊和半自动焊
对接焊缝	拉应力	0.9 [σ]	[σ]
	压应力	[σ]	[σ]
	切应力	0.6 [σ]	0.65 [σ]
角焊缝	切应力	0.6 [σ]	0.65 [σ]

注：1. 本表适用于低碳钢及普通低合金结构钢的焊接结构；
2. [σ] 是母材的许用应力。

我国有些行业部门为了方便和技术上的统一，根据本行业产品特点、工作条件、所用材料、工艺过程和质量检验方法等，制订出适于本行业产品设计用的焊缝系数或焊缝许用应力值。例如，表 6.1-7 和表 6.1-8 分别为起重机结构和钢制压力容器焊缝的许用应力。

表 6.1-7 起重机结构焊缝的许用应力（摘自 GB 3811—1983）

焊缝种类	应力种类	符号	用普通方法检查的焊条电弧焊	埋弧焊或用精确方法检查的焊条电弧焊
对接	拉伸、压缩应力	[σ′]	0.8 [σ]	[σ]
对接及角焊缝	剪切应力	[τ′]	$\frac{0.8[\sigma]}{\sqrt{2}}$	$\frac{[\sigma]}{\sqrt{2}}$

注：[σ] 为基本金属的许用拉应力，[σ′] 为焊缝金属的许用拉应力，[τ′] 为焊缝的许用切应力。

表 6.1-8 钢制压力容器焊缝的许用应力
（摘自 GB 150—1998）

无损探伤的程度	焊缝类型		
	双面焊或相当于双面焊的全焊透对接焊缝	单面对接焊缝，沿焊缝根部全长具有紧贴基本金属垫板	单面焊环向对接焊缝，无垫板
100%探伤	[σ]	0.9 [σ]	
局部探伤	0.85 [σ]	0.8 [σ]	
无法探伤			0.6 [σ]

注：此表系数只适于厚度不超过 16 mm、直径不超过 600 mm 的壳体环向焊缝。[σ] 为基本金属的许用应力。

3.3.2 强度设计值

在我国，按照《钢结构设计规范》(GB 50017—2003) 规定，工业与民用房屋和一般构筑物的钢结构设计，除疲劳强度计算外，应采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，并用分项系数的设计表达式进行计算。该表达式是为了保证所设计的构件能满足预期的可靠度要求，必须使载荷引起在构件截面或连接中的应力效应小于或等于其强度设计值。

该设计规范已给出了钢材（指母材）的强度设计值和焊缝强度设计值，见表 6.1-9 和表 6.1-10。同时也给出了按正常使用极限状态设计结构或构件的允许变形值，见表 6.1-11 和表 6.1-12。

表 6.1-9 钢材的强度设计值
（摘自 GB 50017—2003） MPa

钢材		抗拉、抗压和抗弯 f	抗剪 f_v	端面承压（刨平顶紧）f_{ce}
牌号	厚度或直径 /mm			
Q235	≤16	215	125	325
	>16 ~ 40	205	120	
	>60 ~ 100	190	110	
Q345	≤16	310	180	400
	>16 ~ 35	295	170	
	>35 ~ 50	265	155	
	>50 ~ 100	250	145	
Q390	≤16	350	205	415
	>16 ~ 35	335	190	
	>35 ~ 50	315	180	
	>50 ~ 100	295	170	
Q420	≤16	380	220	440
	>16 ~ 35	360	210	
	>35 ~ 50	340	195	
	>50 ~ 100	325	185	

注：表中厚度系指计算点的钢材厚度，对轴心受拉和轴心受构件系指截面中较厚板件的厚度。

表 6.1-10　焊缝的强度设计值（摘自 GB 50017—2003）　MPa

焊接方法和焊条型号	构件钢材 牌号	构件钢材 厚度或直径/mm	对接焊缝 抗压 f_c^w	对接焊缝 焊缝质量为下列等级时，抗拉 f_t^w 一级、二级	对接焊缝 焊缝质量为下列等级时，抗拉 f_t^w 三级	对接焊缝 抗剪 f_v^w	角焊缝 抗拉、抗压和抗剪 f_f^w
自动焊、半自动焊和 E43 型焊条的手工焊	Q235 钢	≤16	215	215	185	125	160（140）
		>16~40	205	205	175	120	
		>40~60	200	200	170	110	
		>60~100	190	190	160	110	
自动焊、半自动焊和 E50 型焊条的手工焊	Q345 钢	≤16	310	310	265	180	200（195）
		>16~35	295	295	250	170	
		>35~50	265	265	225	155	
		>50~100	250	250	210	145	
自动焊、半自动焊和 E55 型焊条的手工焊	Q390 钢	≤16	350	350	300	205	220
		>16~35	335	335	285	190	
		>35~50	315	315	270	180	
		>50~100	295	295	250	170	
自动焊、半自动焊和 E55 型焊条的手工焊	Q420 钢	≤16	380	380	320	220	220
		>16~35	360	360	305	210	
		>35~50	340	340	290	195	
		>50~100	325	325	275	185	

注：1. 自动焊和半自动焊所采用的焊丝和焊剂，应保证其熔敷金属的力学性能不低于现行国家标准《碳素钢埋弧焊用焊剂》GB/T5293 和《低合金钢埋弧焊用焊剂》GB/T12470 中相关的规定。
2. 焊缝质量等级应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205 的规定。其中厚度小于 8 mm 钢材的对接焊缝，不应用超声波探伤确定焊缝质量等级。
3. 对接焊缝在受压区的抗弯强度设计值取 f_c^w，在受拉区的抗弯强度设计值取 f_t^w。
4. 同表 6.1-9 注。

表 6.1-11　受弯构件挠度容许值（摘自 GB 5007—2003）

项　次	构　件　类　别	挠度容许值 $[v_T]$	挠度容许值 $[v_Q]$
1	吊车梁和吊车桁架（按自重和起重量最大的一台吊车计算挠度）		
	1）手动吊车和单梁吊车（含悬挂吊车）	$l/500$	
	2）轻级工作制桥式吊车	$l/800$	
	3）中级工作制桥式吊车	$l/1000$	
	4）重级工作制桥式吊车	$l/1200$	
2	手动或电动葫芦的轨道梁	$l/400$	
3	有重轨（质量等于或大于 38 kg/m）轨道的工作平台梁	$l/600$	
	有轻轨（质量等于或小于 24 kg/m）轨道的工作平台梁	$l/400$	
4	楼（屋）盖梁或桁架，工作平台梁（第 3 项除外）和平台板		
	1）主梁或桁架（包括设有悬挂起重设备的梁和桁架）	$l/400$	$l/500$
	2）抹灰顶棚的次梁	$l/250$	$l/350$
	3）除 1）、2）款外的其他梁（包括楼梯梁）	$l/250$	$l/300$
	4）屋盖檩条		
	支承无积灰的瓦楞铁和石棉瓦屋面者	$l/150$	
	支承压型金属板、有积灰的瓦楞铁和石棉瓦等屋面者	$l/200$	
	支承其他屋面材料者	$l/200$	
	5）平台板	$l/150$	

续表 6.1-11

项　次	构　件　类　别	挠度容许值	
		[v_T]	[v_Q]
5	墙架构件（风载荷不考虑阵风系数） 1）支柱 2）抗风桁架（作为连续支柱的支承时） 3）砌体墙的横梁（水平方向） 4）支承压型金属板、瓦楞铁和石棉瓦墙面的横梁（水平方向） 5）带有玻璃窗的横梁（竖直和水平方向）	 l/200	 l/400 l/1000 l/300 l/200 l/200

注：1. l 为受弯构件的跨度（对悬臂梁和伸臂梁为悬伸长度的2倍）。
2. [v_T] 为永久和可变载荷标准值产生的挠度（如有起拱应减去拱度）的容许值；
[v_Q] 为可变载荷标准值产生的挠度的容许值。

表 6.1-12　柱的容许计算变形

项　次	变 形 的 种 类	按平面结构图计算	按空间结构图计算
1	厂房柱的横向变形	H_T/1 250	H_T/2 000
2	露天栈桥柱的横向变形	H_T/2 500	—
3	厂房和露天栈桥柱的纵向变形	H_T/4 000	—

注：H_T—柱脚底面至吊车梁或吊车桁架顶面的高度。

编写：陈祝年（山东大学）

第2章　焊接结构设计基础

焊接结构设计的理论基础是工程力学，如材料力学、结构力学、弹性或弹塑性力学和断裂力学等。我们的任务是运用这些基础理论结合焊接结构和工艺的特点，去解决受力构件设计中的选材、选形和连接等技术问题。

1　材料的选择

选材是焊接结构设计的一个重要内容，选材不当是造成结构破坏的原因之一。选材包括母材和焊接材料的选择。

选择母材的基本原则应当是根据产品设计要求，综合考虑材料的工作性能、加工性能和经济性，使所选材料来源容易，能使结构质量轻，易于制造和服役期内安全可靠。具体选择时考虑以下几点。

(1) 材料的工作性能

工作性能是指材料能承受各种工作载荷的性能和适应各种工作环境的性能。

1) 载荷条件　首先应按承载条件选材。若承受静载的结构，应主要以满足强度要求来选取。承受交变载荷的结构，若属于高应力低循环周次的低周疲劳，在保证一定强度条件下，着重考虑材料的塑性和韧性；若属于低应力高循环周次的高周疲劳，这时强度对疲劳抗力起着主导作用，应选用强度较高的材料。承受冲击载荷的结构，所选材料应具有足够的延性和韧性。按刚度条件设计的结构，其工作应力一般都比较小，但其壁厚较大，这时，所选材料不应是高强度材料，而应当是塑性和韧性好的一般强度材料。

焊接结构多用轧制板材，通常具有方向性。如果在厚度方向受到拉伸载荷，应选择层状夹杂少，厚度方向塑性好的材料，以防止产生层状撕裂。

2) 注意环境条件　是指结构的工作环境，如工作温度、介质和辐照等。

工作温度对材料性能影响很大，它的变化会引起材料组织和性能的变化。因此，对在高温工作的结构应选用具有足够的高温强度、良好的抗氧化性和组织稳定性的耐热材料。对高温刚度要求严格的宜选用蠕变极限高的材料；对高温强度要求高时，要选用持久强度好的材料。工作温度范围在 －20～－296℃之间的结构通常属于低温工作结构，所选材料应具有低温工作性能，其中主要是低温韧度和延性。材料的脆性转变温度应低于工作温度。

焊接结构的工作介质种类很多，受介质的影响也很复杂。气体介质有工业环境大气、水蒸气、海洋湿气、石油气、天然气、氨、氢、氧、氮、氯等；液体介质如海水、酸或碱及其水溶液、各种化学溶液等；固体介质有硫化物、氯化物、溴化物等化学产品，这些介质对结构材料有不同性质和不同程度的腐蚀作用，如均匀腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀、电偶腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀、汽蚀等，这些腐蚀会影响结构的使用寿命，有些能导致脆断和容器的泄漏等。因此，必须针对不同介质及其腐蚀特性选择能抵抗其腐蚀作用的材料。通常耐腐蚀的金属材料价格较高，为了节省材料，可以采用复合材料，这种材料只有工作表面耐蚀，其基体为保证强度的便宜金属；或者选用一般钢材，只在工作表面上堆焊或喷涂耐蚀层。

在核辐照环境中工作的焊接结构，由于中子辐照的作用，会导致材料变脆，其屈服点提高，延性下降，脆性转变温度升高、韧性降低，缺口敏感性增加等，在高温下还会出现辐照蠕变脆性。为此，应选用耐辐照的金属材料。

(2) 材料的加工性能

所选用的材料必须能进行加工，而且不会因加工而改变所需的性能。焊接结构用的金属材料必须具有良好的焊接性，其次是焊前备料过程的各种冷、热加工性能和焊后热处理性能。

1) 金属的焊接性　是指所选材料对焊接加工的适应性，它包含工艺焊接性和使用焊接性。前者要求所选材料必须焊接性较好，焊时不易产生焊接缺陷，尤其不能产生焊接裂纹。后者要求所选材料焊后其焊接接头或整个焊接结构能满足使用性能，如强度、韧度、耐疲劳、耐蚀或耐磨等的要求。因此，对焊后不再热处理的结构，应选择那些在焊接热的作用下，其焊缝金属和热影响区不会引起不利于使用性能变化的金属材料。

评估金属材料焊接性能有各种方法，常用的碳钢是以含碳量作为评价指标，低合金钢常以其碳当量或裂纹敏感性指数等为其评价指标。对于从来没有焊接过的新金属材料，选用前应做焊接性试验。试验结果不符合设计要求的不能选用。

2) 冷、热加工性能　在焊前的备料过程中常对母材进行如矫平、调直、剪切、冲孔、铣、刨等冷机械加工，冷或热的冲压与弯曲成形以及热切割加工等。选材时一定要注意它对这些冷、热加工的适应性。有些材料如低强度结构钢经冷加工后呈现严重应变时效脆性倾向，应引起注意。

3) 热处理性能　焊接结构制造过程中，若需要进行消除应力热处理或最终恢复性能的热处理时，则需注意热处理过程中的加热温度、保温时间、升温速度和冷却速度等工艺参数对材料性能的影响。焊后需热处理的金属结构宜选用具有较低回火脆性倾向和较低再热裂敏感性的金属材料。

(3) 经济性

在满足结构工作性能和加工性能的前提下，尽量选用来源容易、价格便宜的金属材料。但要注意，强度等级较低的钢材，其价格一般都较低，其焊接性能也较好，可是其在重载情况下使用，会导致结构尺寸加大、耗材增多，其综合成本未必下降；而且大尺寸的结构，其工艺性和抗脆断性变差。而强度等级较高的钢材，虽然价格较高，焊接难度较大，但可省材料，减小产品尺寸和质量，其综合成本未必上升。

2　结构形状的选定与设计

当结构材料选定之后，即需解决受力构件的选形问题。选形问题实质上就是选定或设计同时能满足强度、刚度和稳定性要求的结构形状和尺寸。

结构形状的选定和设计的过程，就是解决在外力作用下如何使所选材料的性能得到最有效利用的过程。设计的基本原则是满足结构使用性能的前提下其制造成本最低。而决定制造成本的两个因素是：用材量多少和是否易于制造。

结构几何形状和尺寸的确定与承载条件密切相关，在静载条件下和在动载条件下的结构设计有区别，因为两者的力学行为不完全相同。

2.1　静载条件下的结构设计

在静载条件下决定构件强度、刚度和稳定的因素，一是构件的材料性能，如抗拉强度或屈服点，抗弯和抗剪弹性模量；二是构件的截面性能，如构件的截面面积、惯性矩、惯



性半径和截面模量等。若材料已选定，提高构件的强度和刚度的措施就是设计出能获得最佳截面性能的截面形状和尺寸。焊接结构的最大特点是设计的自由度大，受制造工艺的限制较少，基本上可以按最合理的受力情况进行构造设计。这样的设计可能有各种不同的方案，我们可以从技术和经济两方面优选出最佳的设计方案。

2.1.1 保证静载强度的结构设计

结构设计的静载强度条件是

$$\sigma_{max} \leqslant [\sigma] \text{ 或 } \tau_{max} \leqslant [\tau]$$

此表达式说明，作用于构件横截面上危险点的最大应力——正应力、剪应力或相当应力不应超过许用应力，否则不能满足强度要求。显然，降低危险点最大应力的一切措施，对提高构件的强度都是有效的。以简单受力构件为例，其横截面上的最大应力可按表 6.2-1 所列的基本公式计算。从表中公式看出，减小载荷（P、V、M、M_t）或增大构件的截面性能（A、W_b、I_x、W_t、I_t）都可以降低应力，即能提高其强度。当载荷给定，即可通过结构设计提高这些截面性能来达到提高其强度的目的。值得注意的是，决定受弯和受扭构件强度的截面性能是 W_b、I_x、W_t 和 I_t 而和构件的截面积 A 无直接关系。说明截面的几何形状和尺寸对结构抗弯和抗扭的能力有很大的影响，而横截面积 A 仅反映材料的消耗或结构的质量。因此，最合理的设计应当是用最少的截面积（即材料消耗）来达到最大的抗弯和抗扭的截面性能。表 6.2-2 列举了截面积相同而截面形状各异的抗弯和抗扭截面的性能比较，从这些资料中就可以根据实际需要来选择最佳的截面形状。

表 6.2-1 构件静载强度计算的基本公式

载荷类型	计算公式	备 注
拉伸或压缩	$\sigma_{max}=\dfrac{P}{A_{min}}$	σ_{max}—最大正应力，MPa τ_{max}—最大切应力，MPa P—轴向力，N V—剪切力，N M—弯矩，N·m M_t—扭矩，N·m A_{min}—受力构件最小横截面积，mm² W_b—抗弯截面模量，mm³ S_{max}—中性轴（X）以上或以下面积对该轴的静矩，mm³ I_x—截面对中性轴（X）的惯性矩，mm⁴ b—矩形截面宽度，mm W_t—抗扭截面模量，mm³ t_{max}—非圆截面的厚度，mm I_t—非圆截面抗扭惯性矩，mm⁴
剪切	$\tau_{max}=\dfrac{V}{A_{min}}$	
弯曲（矩形截面）	$\sigma_{max}=\dfrac{M}{W_b}$ $\tau_{max}=\dfrac{QS_{max}}{I_x b}$	
扭转	圆截面：$\tau_{max}=\dfrac{M_t}{W_t}$	
	非圆截面：$\tau_{max}=\dfrac{M_t t_{max}}{I_t}$	

表 6.2-2 各种截面形状的惯性矩比较（各面积约 10 000mm²）

序号	截面形状	抗弯惯性矩 I_b/cm⁴	抗弯惯性矩相对值	抗扭惯性矩 I_t/cm⁴	抗扭惯性矩相对值
1	φ113	800	1	1 600	1
2	φ113, φ160	2 420	3.03	4 833	3.02
3	φ160, φ196	4 030	5.04	8 074	5.05
4	φ160, φ196			108	0.07
5	25, 10, 25, 300, 150	15 520	19.4	143	0.09
6	100, 100	834	1.04	1 400	0.88
7	200, 50	3 333	4.17	703	0.44
8	100, 100, 148, 148	3 164.9	3.96	4 576	2.86
9	148, 148, 184, 184	5 554	6.96	8 234	5.15
10	50, 200, 235, 85	5 860	7.32	2 647	1.65



（1）受拉或受剪构件

受拉或受剪的构件设计最为简单，只需增加其工作面积即可提高其静载强度，而与其截面形状无关。面积足够就可以按其他要求来选择截面形状。无其他要求时，可以选用结构较为紧凑的截面形状，如图 6.2-1 所示。设计拉杆时要注意，沿其长度拉力不变或变化不大时，宜设计成等截面直杆，以便于制造。只有当拉力沿长度变化较大时按等强度设计才是经济的。这时注意使截面变化处有圆滑过渡，以减小应力集中。此外，要设法使拉力通过拉杆的轴心，若偏心受拉，将会产生附加弯矩，需按拉弯构件进行强度计算；设计受剪构件时，应使方向相反的两切力垂直距离尽可能的小，以减小因此而产生的弯矩。

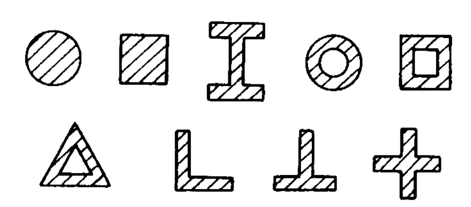


图 6.2-1　轴向受力构件常用截面形式

（2）受压构件

受压构件的强度设计方法决定于它的长细比，对短而粗的受压构件，其强度设计与受拉构件完全相同，强度不足增加其截面积即可。当偏心受压时需按压弯构件进行强度计算。对于细而长的受压构件（常称为压杆），应考虑可能有压杆稳定问题，需进行稳定性的计算。其截面性能不仅要求有足够的面积，还要有最小的惯性半径（又称回转半径，详见后述），其截面形状和尺寸对压杆稳定性影响较大。

（3）受弯构件

受弯的构件常称为梁，梁的设计需同时解决强度、刚度和稳定性等问题。它们之间相互制约。受横向载荷的梁，其强度问题必须同时满足正应力强度条件和剪应力强度条件。但是，长的梁往往弯矩 M 很大，这时主要考虑正应力强度条件，剪应力强度条件只作校核或忽略。当梁很短时，梁内弯矩不很大，而剪切力 V 比较大，这时就不能忽略剪应力强度条件。横弯曲时，梁横截面上除距中性轴最远的点外，其余各点上均为复杂应力状态（薄壁梁除外），对这些点的强度计算时，必须计算其主应力，然后按相应的强度理论进行计算。

考虑正应力强度条件时，决定强度的截面性能是抗弯截面模量 W_b 或抗弯惯性矩 I_b，可以参照表 6.2-2 的资料进行选择或设计所需的截面结构。从该表中看出，面积相同的矩形截面梁和正方形截面梁相比，只要矩形截面梁竖放（即高大于宽），则矩形截面梁的强度比方形截面梁高。面积相同的矩形截面梁，其高度越大越经济。但过高的梁须防止弯曲时可能发生侧向失稳问题。

从经济考虑，在满足强度的前提下，横截面积 A 越小越好。在梁高相同情况下，圆形截面梁不及矩形截面梁经济；矩形截面梁又不及工字型钢或槽钢经济，主要原因是前者材料没能充分利用。图 6.2-2a 为矩形截面梁横截面上应力的分布规律，远离中性轴处正应力最大。该处应该配置最多的材料。中性轴处正应力为零，剪应力最大，但它的值一般很小，可以少配置材料。说明矩形截面梁中性轴处的材料没能发挥作用。工字形截面梁是把较多的材料配置在翼缘上（图 6.2-2b），去承受最大的正应力，再用较少材料配置在腹板上，承受数值不大的剪应力，这样材料都得到了充分的利用。所以经济合理的梁，其截面结构设计应尽可能把材料远离中性轴配置。

为便于制造，受弯的焊接构件尽可能设计成直梁，短梁宜设计成等截面梁；当跨度较大，为了节省材料和降低质量可设计成等强度梁，即变截面梁；当材料的拉和压许用应力相同时，选用双轴对称且其形心在梁中央的横截面形状最为合理，如矩形、箱形、十字形和工字形截面等。其次是单轴对称的，如 T 形、槽形和 Π 形截面等。尽量避免非对称的截面形状。无论采用那一种截面的梁，设计时都要设法使横向力的合力通过梁截面的弯曲中心，否则该梁除发生弯曲以外，还会发生扭转。对这种弯扭组合梁的强度，就必须作更多更复杂的计算。梁截面弯曲中心的位置一般是：具有两个对称轴或反对称轴（如 Z 字形）的截面，其弯曲中心与形心重合；只有一个对称轴的截面，其弯曲中心在对称轴上。双轴均不对称截面的弯曲中心需按实际截面的形状和尺寸通过计算才能确定。

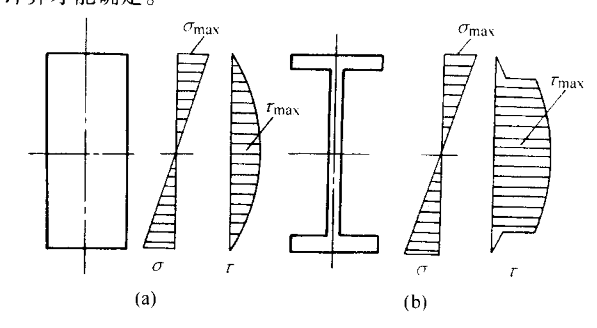


图 6.2-2　矩形和工字形截面梁横截面上应力分布

（4）受扭构件

受扭构件的强度计算比较复杂，因为截面上的剪应力分布受截面形状影响很大，往往需具体结构具体分析。构件截面的外形可归纳为圆形截面和非圆形截面两类，这两类截面的构件具有不同的变形特性，故其应力计算公式不同（见表 6.2-1）而且后者是近似的。从表 6.2-2 看出，外形相同的杆件，实心的和空心的截面其抗扭截面性能不同；空心截面的杆件，其截面封闭与否其抗扭截面性能差别很大，表中序号 3 和序号 4 同为圆管状截面，后者因不封闭（常称为开式截面），它的抗扭惯性矩还不到闭式的 1.4%。显然，受扭构件截面的设计应优先采用空心闭式结构。在开式截面杆件中，剪应力的大小，不仅与截面形状有关，而且与壁厚有关。如果是薄壁杆件，还和杆端的拘束程度有关（详见“薄壁焊接结构”章）。

受扭的圆轴，最大剪应力位于轴表面，其大小与轴直径的三次方成反比。只需增大轴的直径即能提高其强度。由于轴心的剪应力为零，说明若用实心轴，则材料没有被充分利用。因此，对大型的圆轴经济合理的设计应当是用空心轴，即把材料远离形心配置。或者说，用同样数量的材料设计成空心截面轴，其抗扭截面模量可以增加，从而可以提高轴的承载能力。分析比较还表明，同是空心截面的圆管与正方形管比较，在同长、同质、同厚度和同面积的情况下，受同样的扭矩作用时，圆管的应力比正方管小 21.5%。说明受扭构件宜设计成圆形。

（5）复杂受力构件

复杂受力的构件一般产生组合变形。其横截面上最多有六个内力，即 N_x、Q_x、Q_y、M_x、M_y 和 M_t 等，它们分别对应于轴向拉伸或压缩（N_x）、剪切（Q_x 和 Q_y）、弯曲（M_x 和 M_y）和扭转（M_t）等四种基本变形。当构件同时有两种以上基本变形时，在材料服从虎克定律和小变形条件下，可以根据力的独立作用原理，分别对各种基本变形进行计算。然后叠加，即可得到组合变形时的应力。对于简单应



力状态的组合变形，如斜弯曲、拉伸或压缩与弯曲的组合、偏心拉伸或压缩等，可以直接进行强度验算。对于复杂应力状态的组合变形，如弯曲与扭转的组合，则应按相应的强度理论进行强度计算。强度不足时，同样应从提高构件的截面性能入手，改变截面的形状或尺寸。组合变形中，若弯曲变形是主要的，则主要提高其抗弯惯性矩；若扭转变形是主要的，则主要是提高其抗扭惯性矩。

2.1.2　保证刚度的结构设计

结构设计的刚度条件是：工作变形不超过许用变形。超过了许用变形，就意味着结构的刚度不足。

高工作精度的机器，对其承载构件刚度的要求比强度更为重要，这些构件通常是按刚度进行结构设计。待结构截面形状和尺寸确定之后，再进行强度或稳定性校核。

刚度是指在恒定载荷下或在交变载荷下构件抵抗变形的能力。前者称静刚度，后者称动刚度。常说的刚度设计主要指静刚度设计，广义的静刚度定义为

$$静刚度=\frac{静载荷}{载荷方向的位移}$$

根据构件承载类型不同，静刚度有不同的表达式，见表6.2-3。

表 6.2-3　静刚度计算表达式

载荷类型		表达式	单位						
拉伸或压缩	变形	$\Delta l=\frac{Pl}{EA}$	符号	Δl	l	P	E	A	
			单位	mm	mm	N	N/mm^2	mm^2	
	静刚度	$K=\frac{P}{\Delta l}=\frac{EA}{L}$	符号	K					
			单位	N/mm					
弯曲	变形	$f=\frac{Pl^3}{CEI_b}$	符号	f	l	P	C	E	I_b
			单位	mm	mm	N	—	N/mm^2	mm^4
	静刚度	$K_b=\frac{P}{f}=\frac{CEI_b}{l^3}$	符号	K_b					
			单位	N/mm					
扭转	变形	$\varphi=\frac{M_t l}{GI_t}$	符号	φ	l	M_t	G	I_t	
			单位	rad	mm	N·mm	N/mm^2	mm^4	
	静刚度	$K_t=\frac{M_t}{\varphi}=\frac{GI_t}{l}$	符号	K_t					
			单位	N·mm/rad					

注：K 为静刚度，其下标 b 表示弯曲；t 为扭转；C 为与支承条件有关的常数。

从表6.2-3看出，构件的静刚度是与所用材料的弹性模量（E 或 G）和它的截面特性值（F、I 或 I_t）乘积成正比，而与材料的强度无关。因此，在刚度设计中应选择高弹性模量的钢材，而不是高强度钢。鉴于焊接用钢的弹性模量相差不大，所以焊接结构静刚度设计的主要工作是确定构件的截面形状和尺寸。尽可能做到用最少的材料来达到最大的截面性能。

（1）抗拉或抗压构件截面形状的设计

轴心受拉伸或压缩的构件，其横截面上的正应力未超过材料的比例极限时，则杆的变形（伸长或缩短）Δl 与轴向力 P 及杆长 l 成正比，而与横截面面积 A 成反比。因此，提高这类杆件刚度的结构措施是，减小杆件的长度或增加其横截面面积，而与截面的形状无关。也就是轴心受力的杆件，应当是短而粗，而不是细而长。但要注意，受压杆件有稳定问题，它对结构截面形状、面积、壁厚等有特殊要求，见后面2.1.4节。

（2）抗弯截面形状的设计

梁是焊接结构中最基本构件，工作时主要承受弯曲载荷。梁的抗弯刚度是与材料的弹性模量 E 和截面抗弯惯性矩 I_b 的乘积成正比。材料选定后，梁的抗弯刚度主要决定于截面抗弯惯性矩 I_b 的大小。在截面积相同（即质量相同）情况下可以设计出不同断面形状的梁，如表6.2-2所示。从表中看出，空心截面的抗弯惯性矩比实心的大；方形截面的抗弯刚度比圆形的大，外形尺寸大而壁薄的截面，其抗弯刚度比外形尺寸小而壁厚的高。所以提高构件的抗弯刚度，首先应加大截面的轮廓尺寸，而不是壁厚，其次是尽可能把结构材料配置在远离中性轴处。工字梁和箱形梁的设计就是典型的例子。

（3）抗扭截面形状的设计

承受扭转载荷的构件，必须具有足够抗扭刚度。构件工作截面的抗扭刚度与材料的剪切弹性模量 G 和截面的抗扭惯性矩 I_t 乘积成正比。材料选定后，构件的抗扭刚度决定于抗扭惯性矩 I_t 的大小。抗扭惯性矩的计算比较复杂，不同的截面形状须采用不同的计算公式。从表6.2-2列出具有相同截面积的各种简单截面形状的抗扭惯性矩 I_t 比较可以得出：空心截面比实心截面的抗扭惯性矩大；空心截面中，封闭截面比不封闭（又称开式）截面抗扭惯性矩大很多；空心封闭的各种截面中，圆筒形截面比方箱形的抗扭惯性矩大；空心封闭正方形截面具有抗弯和抗扭惯性矩均较高的综合性能。因此，受扭转构件截面形状的设计原则，刚度设计和强度设计基本一致，即只要条件允许，都应选择空心封闭的截面；优先选择圆筒形截面，其次是箱形截面。选用箱形截面的构件，在扭矩作用下，在截面的四个拐角处将发生不能保持直角的变形，称截面畸变。解决这种畸变的办法最常用的是在箱体内部合理地设置肋板。

（4）肋板的设置

提高结构刚度，除合理设计截面形状外，还可以合理地利用隔板或肋板来达到。尤其是受扭构件当无法采用封闭的截面时，隔板或肋板的作用非常明显。为了叙述方便，在这里把能提高结构整体或局部刚度的附加板件（通常称为筋板、隔板、加强肋等）统称肋板。

肋板之所以能提高结构的整体或局部刚度，在于它能把作用在结构上的局部载荷传递给其他构件，使它们能均衡地承载；也能把垂直于板壁的弯曲变形转化为肋板平面内的拉伸、压缩或弯曲变形，而这类变形的数值很小，因而可使主体壁板减薄；利用肋板可以把壁板的幅值从大分隔成小，因而能提高其抗曲性能；横向肋板可以连结箱形构件的四壁作为一个整体起作用，当扭转时，可以减少截面畸变。

肋板的作用效果主要不是依靠它的数量多少，而在于正确地配置。肋板能否发挥作用，要看它的受力方向，如果所设置的肋板使它受到垂直方向的力或成一定角度的力作用，则发挥作用极小。如图6.2-3a所示的力系作用在肋板的平面内，引起的是平面弯曲，恰好是肋板抗弯惯性矩 I_b 最大的方向，其抗弯能力最强，结果引起的挠曲变形很小，对提高结构刚度是有用的；图6.2-3b所示的肋板受到垂直板平面的四个力，且构成扭矩，而该肋板的截面为开式截面，抗扭惯性矩 I_t 很低，因而引起很大的扭转变形，起不到提高刚度的作用。图6.2-4虚线所示为机架，视为刚体。当受扭时，在其上表面任一点的剪应力状态如图中 m 点所示。与之对应，在下表面的剪应力状态则相反。如果框架内有三块不同位置的肋板，则在纵向肋板1和横向肋板2上作用的力是垂直的，且构成了扭矩，其抗扭能力弱。只有呈45°角布置的斜肋板3上，因剪应力 a 和 b 的合力使它受到板平面内（上拉下压）的弯矩，这时它具有很强的抗弯能力。说明受扭的机架，设置斜肋板才能提高抗扭刚度，如果斜45°且交叉地布置，则效果最佳。而纵向和横向的肋板基本上没有抗

扭作用。同理，当一根箱形梁，受到横向弯曲时，内部设置平行梁轴线的纵向肋板才能提高梁的抗弯刚度，而垂直梁轴线的横向肋板，则没有抗弯能力。如果箱形梁受到扭矩，纵、横肋板均无助于提高抗扭刚度，但横向肋能抑制箱形梁的畸变。

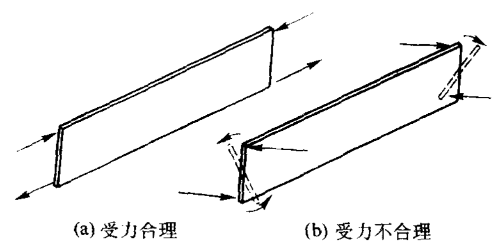


图 6.2-3　肋板受力分析

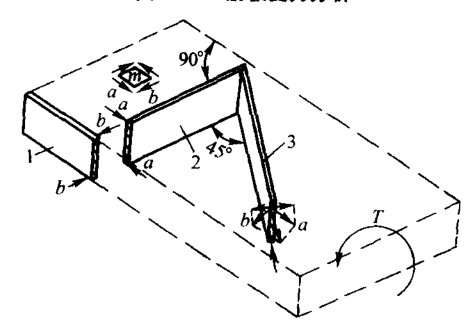


图 6.2-4　机架受扭时，肋板的受力分析

1—纵向肋板；2—横向肋板；3—斜（45°）肋板

（a、b 为剪切力，T 为扭矩）

2.1.3　等价截面的结构设计

原有的机器零、部件因变换材料而需要重新设计时，常用等价截面设计法。它是使新设计的构件截面具有与原构件截面相同强度或刚度的一种设计方法。当要求强度相同时，按等强度原则进行设计；要求刚度相同时，按等刚度原则进行设计。

采用等价截面设计法必须知道原构件所用材料及其性能，以及原构件工作截面的形状与尺寸的大小。至于原构件承载性质及其大小知道与否并不重要，但原构件必须是一直安全可靠地使用着，并已经证明原构件具有足够的承载能力。

（1）原理

一个构件的强度可以用它的强度系数来表达，强度系数等于反映材料性能的许用应力和截面特性值的乘积；一个构件的刚度可以用它的刚度系数来表达，刚度系数等于反映材料性能的弹性模量和截面特性值的乘积。对于承受不同载荷类型的构件，其强度系数和刚度系数的表达式分别列于表 6.2-4 中。

表 6.2-4　强度系数与刚度系数表达式

载荷类型	强度系数		刚度系数	
	材料性能	截面性能	材料性能	截面性能
拉伸或压缩	$[\sigma_l]$	$\times F$	$E \times F$	
剪切	$[\tau]$	$\times F$	$G \times F$	
弯曲	$[\sigma_l]$	$\times W$	$E \times I_b$	
	$[\sigma_y]$	$\times W$		
扭转	$[\tau]$	$\times W_t$	$G \times I_t$	

注：$[\sigma_l]$、$[\sigma_y]$、$[\tau]$ 分别为材料的拉伸、压缩、切剪的许用应力，10^4 Pa；E 为材料的拉伸弹性模量，10^4 Pa；G 为材料的剪切弹性模量，10^4 Pa；F 为构件截面积，cm^2；W 为构件的抗弯截面模量，cm^3；W_t 为构件的抗扭截面模量，cm^3；I_b 为构件的抗弯惯性矩，cm^4；I_t 为构件的抗扭惯性矩，cm^4。

令新设计构件的材料为 A，原构件的材料为 B，若按等强度原则设计时，则使两个构件的强度系数相等；按等刚度原则设计时，使两个构件的刚度系数相等。于是得出表 6.2-5中所列的等价截面设计用的计算公式。

表 6.2-5　等价截面设计计算公式

载荷类型	等强度设计	等刚度设计	
拉伸	$F_A = \frac{[\sigma_l]_B}{[\sigma_l]_A} F_B$	$F_A = \frac{E_B}{E_A} F_B$	
压缩	$F_A = \frac{[\sigma_y]_B}{[\sigma_y]_A} F_B$	短柱	$F_A = \frac{E_B}{E_A} F_B$
		长柱	$I_A = \frac{E_B}{E_A} I_B$
弯曲	$W_A = \frac{[\sigma_l]_B}{[\sigma_l]_A} W_B$	$I_A = \frac{E_B}{E_A} I_B$	
扭转	$W_{tA} = \frac{[\tau]_B}{[\tau]_A} W_{tB}$	$I_{tA} = \frac{G_B}{G_A} I_{tB}$	

注：表中下标 A 和 B 分别代表两种不同材料。

（2）设计步骤

等价截面设计的大致步骤如下。

1）通过结构分析，确定所设计构件承受载荷的类型，并明确是按等强度原则设计还是按等刚度原则设计。

2）根据原构件所用的材料和截面形状与尺寸，确定相应的材料性能和计算其截面特性值。

3）考虑了新材料相应的性能，用表 6.2-5 中有关的公式求出新构件所需的截面特性值。

4）按求出的截面特性值确定新构件的断面形状和尺寸。

进行等价截面的结构设计时要注意由于材质的改变，可能出现下列的新问题。

1）焊接性　新构件用的材料必须是可焊的金属材料。

2）屈曲（失稳）问题　当新构件用的材料强度比原构件强度高很多时，按等强度原则设计的新结构必然质量轻，尺寸小，构件壁厚会变薄。这时要注意防止产生薄壁屈曲（失稳）问题，尤其是受压构件，应进行校核。必要时适当增加壁厚或设置肋板以提高抗失稳能力。

2.1.4　抗失稳的结构设计

要保证构件的稳定性，必须同时满足整体稳定和局部稳定。前者通过限制构件的长细比来控制，后者是通过控制其宽厚比来实现。

轴心受压构件整体稳定条件是工作应力小于失稳的许用应力。而失稳的许用应力是以构件的失稳临界应力为依据，考虑了稳定安全系数后确定的。

在比例极限内压杆稳定的失稳临界应力为

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \tag{6.2-1}$$

式中，σ_{cr}为压杆截面失稳临界应力；E 为材料的弹性模量；λ 为压杆的长细比，又称压杆的柔度。

$$\lambda = \frac{\mu l}{i_{min}} \tag{6.2-2}$$

式中，μ 为考虑压杆两端支承条件的长度系数；l 为压杆实际长度，常令 l_0（$=\mu l$）为计算长度；i_{min}为最小惯性半径，$i_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}}$；$I_{min}$为构件横截面的最小抗弯惯性矩；$A$ 为压杆横截面积。

上式适用范围是 $\sigma_{cr} < \sigma_p$（σ_p 为材料的比例极限），或 $\lambda \geqslant \lambda_p$（$\lambda_p$ 为临界长细比，对 Q235A 钢，$\lambda_p \approx 100$）。



提高构件失稳临界应力的一切结构措施，都可以提高受压构件的稳定性。从上式看出，选用高弹性模量 E 的金属材料是有效的，但对焊接用钢来说选择余地有限；最主要也是最有效的是减小压杆的长细比 λ，因为 σ_{cr} 与 λ 的平方成反比。具体设计时，可以是缩短压杆的长度、改变杆端的支承条件或扩大截面的最小的惯性半径 i_{min}。后者是把材料远离中性轴布置，以最少的截面积 A 去获得尽可能大的最小惯性矩 I_{min}。

在工程中，常采用以应力表达的稳定条件来进行结构设计，即

$$\sigma=\frac{P}{A}\leqslant\varphi\ [\sigma]\ \text{或}\ \sigma=\frac{P}{\varphi A}\leqslant\ [\sigma]$$

式中，σ 为压杆横截面上的压应力；P 为轴向压缩力；A 为横截面积；$[\sigma]$ 为材料的许用压应力；φ 为随构件长细比 λ 而变化的折减系数，可按图6.2-5的 $\varphi-\lambda$ 曲线查得。

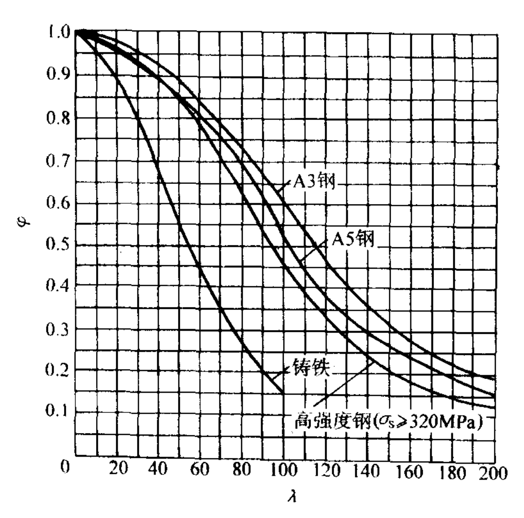


图 6.2-5 几种材料的 $\varphi-\lambda$ 曲线
（A3 钢相当于 Q235 钢，A5 钢相当于 Q275 钢）

在应用上式计算压杆的截面积时，因 φ 与 A 有关，故需采用逐次渐近法。通常第一次试算取 $\varphi_1=0.5\sim0.6$，代入上式求出毛面积 A 和选择相应的截面形式，按该截面计算 I_{min}、i_{min} 和 λ 值，即可求得实际的 φ_1' 值，如果 φ_1' 和 φ_1 差别不大，则一次成功，否则取这两者之间的平均值进行第二次试算。按此，一般试算 2～3 次即可成功。

局部失稳多发生在结构局部板壁过薄部位。这种失稳与杆件整体失稳不同，杆件的临界载荷即破坏载荷，而薄板中面受载可以超过临界载荷而不破坏，需用弹性理论解决。工程设计中常用该部位的宽厚比进行控制，详见本篇第 4 章。

2.2 动载条件下的结构设计

载荷的大小、作用方向和作用点随时间而变化的，称动载荷。短时快速作用的称冲击载荷，随时间作周期性变化的称周期载荷，否则为非周期变化的随机载荷，统称交变载荷。承受这些不同性质载荷的构件，它与静载荷的结构设计有较大区别。

2.2.1 保证疲劳强度的结构设计

受交变载荷作用的构件需进行疲劳强度设计。疲劳强度设计的方法有许用应力设计法、断裂力学设计法和可靠性设计法等。目前仍以许用应力设计法应用最为普遍，其强度条件是

$$\sigma_{max}\leqslant\ [\sigma_r]$$

式中，σ_{max} 为设计载荷引起的最大应力值；$[\sigma_r]$ 为许用应力。以实验的疲劳强度为基础考虑了各种影响因素和安全系数后确定。

上式说明了疲劳强度设计也和静载强度设计一样，仍然是以构件上的最大工作应力不超过规定值为安全。而最大工作应力的分析与计算和静载强度设计是一样的，它与载荷大小成正比，与截面性能（截面积、截面模量或惯性矩等）成反比。因此，凡能获得截面性能值大的截面形状和尺寸的设计，都可降低该构件的最大工作应力，也就提高了它的疲劳强度。所以确定构件截面形状的方法与前述静载条件下确定截面形状和尺寸的方法是一样的。

但是，影响构件疲劳强度的因素比静载强度要复杂得多。两者破坏的力学行为不同，疲劳破坏首先是从有应力集中点开裂，经逐渐扩展后而发生。因此，要提高结构的疲劳强度，除了用上述增大它的截面性能以降低其最大工作应力的重要措施外，还需采取一些措施去提高它的许用应力 $[\sigma_r]$，其中最有效的方法是减少或消除结构上可能产生应力集中的一切因素。如在结构的选形上，要避免用截面有突变的构造形式；或在截面变化处采用较大圆滑过渡的结构；降低构件表面和焊缝表面的粗糙度等。表 6.2-6 列举了受交变载荷的构件在结构细部设计上与受静载结构的区别。

表 6.2-6 常温下承受静载荷与交变载荷的焊接结构在细部设计上的区别

序号	静载荷下工作	交变载荷下工作
1	<10 >10	<3 3 >3
2		$<1/3$



续表 6.2-6

序号	静载荷下工作	交变载荷下工作
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		

2.2.2　保证冲击强度的结构设计

在很短时间内以较高速度作用于构件上的载荷，称冲击载荷。金属材料、零件和构件抵抗冲击破坏的能力谓冲击强度。对受冲击构件有两种设计方法：一是确定受冲击最大力，引入一动载系数，然后按静载强度进行计算；另一是能量法，即计算构件吸收冲击能量后所产生的应力，以不超过最大许用应力为安全。后一设计方法较为精确。

用能量法对几种常用构件在不同受载条件下进行应力分析表明：提高冲击强度的结构措施仍然是增加其截面性能。设计要点如下。

① 把构件设计成一个能量吸收系统，即要用尽可能大的材料体积来承受最大的工作应力，这样有助于吸收能量。

② 对于给定截面的构件，要用最大的面积承受最大的工作应力，也要使构件沿整个长度承受此应力。

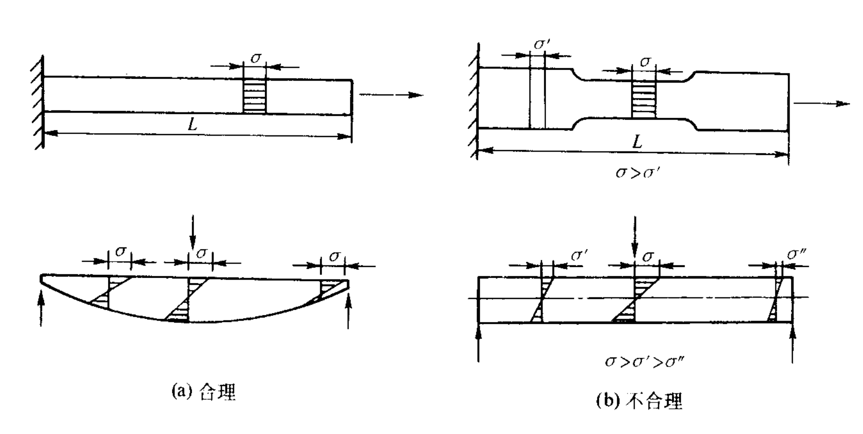
③ 提高受拉构件的截面性能是增加它的体积（AL，A为截面积，L为长度），这样可以减少拉伸冲击应力。

④ 提高简支梁的截面性能是增加它的$\sqrt{I_b L/c^2}$或$\frac{i}{c}\sqrt{AL}$（式中I_b—抗弯惯性矩，L—梁的跨度，c—梁截面中性轴到外缘的距离，i—回转半径，A—梁截面积），可以减少弯曲冲击应力。

⑤ 对简支梁，减少其跨度（L）会减少静态应力，但却增加冲击应力。

⑥ 增加一个不变截面的受拉构件的长度（L），并不会改变静应力，但却减少冲击应力。

根据上述设计要点可以看出图6.2-6示出两种承载条件相同的拉杆和简支梁的结构设计，图左边的设计是合理的。它们共同的特点是，沿整个长（跨）度外缘上都分布了同一的最大应力，比右边的设计节省材料和耐冲击。



(a) 合理　　(b) 不合理

图6.2-6　受冲击载荷构件的设计

注意，受冲击的构件对表面缺口敏感，它影响构件对冲击能量的吸收，应尽量避免。同时也应把应力集中减到最小，如避免采用截面有突然变化的结构等。

2.2.3　抗振的结构设计

机器在运行过程中的振动是由机器本身的固有振动和外来的强制振动所组成。当两者产生共振时，由于振幅增大，机器的工作精度会下降，产生噪声，而且由于交变应力增大，还会引起构件破坏的危险。

解决机器振动问题，一是避免共振，二是抑制共振。

共振是由于外来的激振频率f和机器本身的固有频率f_n相等或接近而引起。如果机器没有减振能力（如阻尼作用），则共振时其振幅是无限大的。要避免共振就必须使f和f_n不相等或不接近，通常是提高机器的固有频率或同时也降低激振频率，使两者差值加大。前者是借助于机器的结构设计来达到。

（1）提高固有频率的结构措施

从物理学得知，物体的固有频率

$$f_n=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{m}}$$

式中，K为物体的静刚度；m为物体的质量。

上式说明，要提高物体固有频率的结构措施是，在提高其静刚度的同时也降低其质量。

以梁构件弯曲振动为例，其固有频率由下式确定：

$$f_n=C\sqrt{\frac{EI_b}{AL^4}}$$

式中，C为与梁的支承条件有关常数；E为梁材料的弹性模量；I_b为梁的抗弯惯性矩；A为梁的截面积；L为梁的非支承长度。

因此，提高梁固有频率的设计是：提高梁的抗弯惯性矩I_b；使用高弹性模量E的材料；减少梁的截面积A，它相当于减轻结构的质量；减少梁的非支承长度L，如在梁的中间设置一个支承或一块肋板就能使非支承长度减少一半，固有频率可增加4倍。

所以梁类构件的结构多采用轮廓尺寸较大、带肋板的薄壁结构，如箱格结构，对抗振是有利的。对抗振要求高的大型构件，其壁板设计成双层壁板较为合理，因为这种结构质量轻、静刚度大，其固有频率比单层壁可提高2～5倍。设计双层壁结构的关键是两薄壁之间正确布置肋板，肋板的作用是提高壁板的静刚度和减小自由面积（即非支承长度）。

（2）提高减振能力的结构措施

1）适当提高钢结构的应力水平　在相同应力下，灰铸铁的阻尼作用比钢大，表现出良好的吸振能力。但是，在一定条件下钢的吸振能力却比铸铁高。研究发现，当钢的工作应力比灰铸铁高2.5倍时，钢的吸振能力反而比铸铁高5.3倍。由于钢材强度比铸铁高，在相同载荷下完全可以通过结构设计（如适当减少所需的惯性矩）使钢件承受高于铸铁件的工作应力，就可以使钢结构件的减振能力高于铸铁件。

由于钢材的弹性模量E比铸铁的高近一倍，适当减少钢结构的惯性矩I_b并不因此而降低它的刚度和固有频率。而且还可以在结构上适当增设肋板以缩短其非支承长度，达到提高结构的固有频率和减少振动的振幅。

2）改善和提高结构的阻尼特性　研究发现，受压接触面的微小相对运动所产生的摩擦具有良好的减振作用，因为这种摩擦可以耗散振动能量，能使振幅迅速衰减下来。灰铸铁的阻尼值之所以比钢材高，这和铸铁内部有片状石墨存在



而构成内摩擦阻尼有关。所以要使改善和提高钢制焊接结构的阻尼特性，主要靠有效的结构设计来达到。

图 6.2-7 示出了外形尺寸相同但材质和构造各异的试件，作阻尼比较试验的结果。图中 a 为灰铸铁，b 为钢板，c 是两钢板不接触，d 是通过点焊使两钢板构成接触面，e 是两钢板叠合接触后沿周边环焊。图上方是各试件开始振动后振幅随时间衰减的情况，可以看出：因灰铸铁的阻尼比大于钢，所以 a 的振幅衰减快于 b，说明灰铸铁具有较大的吸振能力；由于接合面产生摩擦阻尼作用，所以 d 的减振能力达到了灰铸铁的水平；靠环焊缝使两钢板叠合得很好的 e 结构，其减振能力比灰铸铁高 30 多倍；c 的两钢板因不接触而没有摩擦阻尼作用。此试验说明了通过结构设计是可以改善和提高焊接钢结构的阻尼特性的。

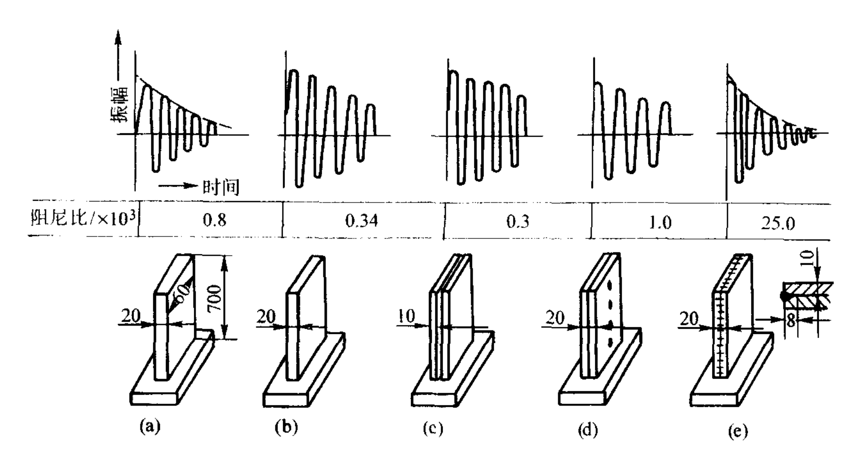


图 6.2-7　材料阻尼与结构性阻尼的比较
（弯曲振动，振幅 $A \leqslant 50\ \mu m$）

研究表明，用两面未焊缝的角焊缝连接的 T 形接头，具有一定的吸振作用。因焊后焊缝金属收缩造成未焊透的结合面之间产生接触压力，振动时该接触面微小的相对移动就发生摩擦阻尼。研究还证明，断续角焊缝的吸振能力优于连续角焊缝。因此，在强度、刚度允许的前提下，对抗振的焊接结构尽可能采用断续角焊缝。

图 6.2-8 所示的是利用摩擦阻尼的减振作用而设计的 U 形接头，这种接头如果能在接合面处预先磨平再在两侧施焊，则效果更好。结合面宽时，可用电阻点焊或塞焊连接，靠焊点和两侧焊缝的收缩在结合面间产生一定接触压力。图 6.2-9 是大型焊接结构中为了抗振而采用的双层壁。它的内外壁板与肋板之间就是利用这种 U 形接头进行连接的。这种双层壁不仅具有很好的抗振能力，而且刚度大、质量轻、局部和整体稳定性都很好。

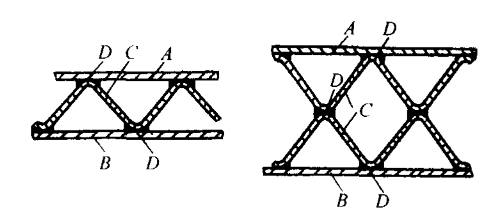


图 6.2-8　U 形减振接头
A、*B*—壁板；*C*—波浪肋板；*D*—结合面

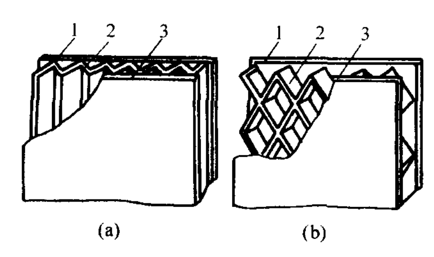


图 6.2-9　双层壁板的结构
1—外壁板；2—肋板；3—内壁板

3　考虑可达性的结构设计

应当避免给施工带来很大困难和增加很高制造成本的结构设计。焊接结构上每一条焊缝都应该能很方便地施焊，需质量检验的焊缝应该能顺利地进行探伤。

3.1　焊接的可达性

要使每条焊缝都能施焊，必须保证焊工或焊接机头能接近焊缝，并在焊缝周围有供焊工自由操作和焊接装置正常运行的条件。不同的焊接方法和用不同的焊接装置，要求的条件是不同的。

例如，设计采用埋弧自动焊的焊接结构，焊缝的设计必须是平直长焊缝或环形焊缝，而且能处于平（俯）焊位置；沿焊缝有供自动机头（或机械手）和工件之间相对运动所需的空间以及能安置相应辅助装置的位置。

设计用半自动 CO_2 气体保护焊的焊接结构要考虑焊枪必须有正确的操作位置和空间才能保证获得良好的焊缝成形。焊枪的位置是根据焊缝形式、焊枪的形状和尺寸（如喷嘴的外径尺寸等）、焊丝伸出长度和接头坡口角度大小来确定。图 6.2-10 示出几种接头焊接时，焊枪的正常位置。

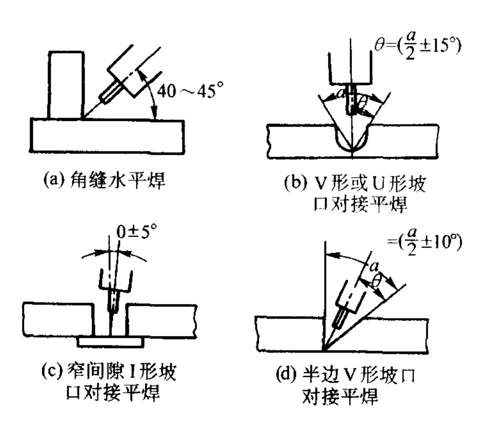


图 6.2-10　半自动 CO_2 气体保护焊焊枪位置

设计用焊条电弧焊接的结构，应使焊工能接近每一条焊缝，并保证焊工在操作过程能看清焊接部位且运条方便自如；避免焊工处于不正常的姿势下焊接。

图6.2-11是具有两个以上平行的T形接头的结构，要保证该结构焊条电弧焊角焊缝的质量，就必须考虑两立板之间的距离 B 和高度 H，以保证焊条可以倾斜一定角度 α 和运条空间。这个 α 角与平板和立板的厚度有关。图6.2-11a因焊条倾角 α 无法保证，两立板之间至少有一条角焊缝无法施焊。如果尺寸 H 和 B 不能改变，可以改变接头的焊缝设计，如图6.2-11b所示，后装配和焊接的立板采用从外侧单面坡口焊，为了防止烧穿，背面可设置永久垫板。否则，改变结构尺寸，如图6.2-11c，把 B 加大为 B'，以保证焊条必要的倾角 α。或如图6.2-11d所示，把 H 降低为 H'。

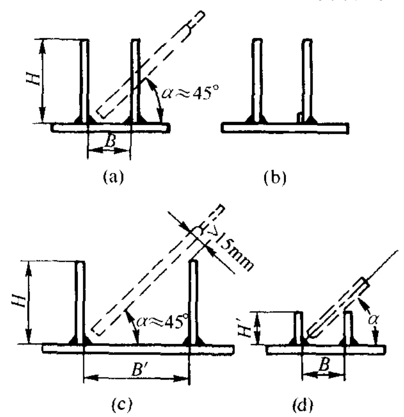


图6.2-11 焊条电弧焊接时的操作空间

图6.2-12a为管子对接的接头设计，该接头错误地采用X形坡口，内侧的焊缝，无法施焊。应采用单面的V形或U形坡口。内侧采用衬环可以保证焊透，见图6.2-12b，缺点是衬环增加管内流体的阻力，且防腐蚀性能欠佳。若采用单面焊背面成型焊接技术，则设计成图6.2-12c的坡口形式。

图6.2-13所示的是由型材组合的焊接结构。图中左边的结构是最容易犯的设计错误，有部分焊缝无法施焊。应改成右边的结构设计。

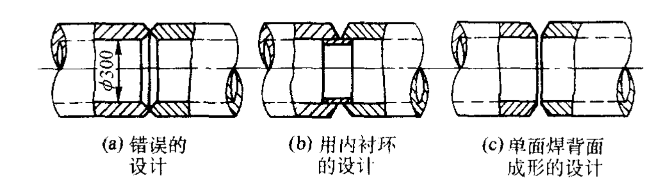


图6.2-12 小直径管子对接接头的设计

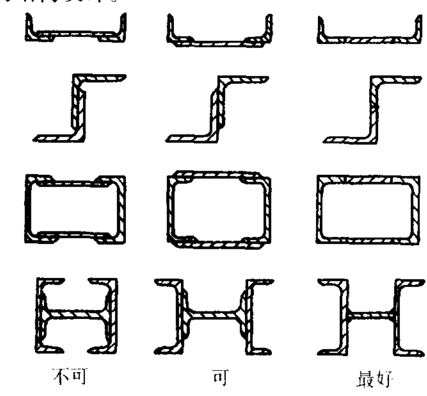


图6.2-13 考虑焊缝可施焊的型材组合结构

3.2 焊缝质量检验的可达性

焊接结构上需要作质量检验的焊缝，其周围必须创造可以探伤的条件。采用不同的探伤方法相应有不同的要求，表6.2-7是焊接生产中常用几种焊缝探伤方法所要求的条件，在进行结构设计时应充分考虑。

(1) 适于射线探伤的焊接接头

目前X射线探伤中以照相法应用最多。为了获得一定的穿透力和提高底片上缺陷影像的清晰度，对于中厚板一般焦距在400~700 mm范围内调节，据此，可以确定机头到工件探测面的距离以预留焊缝周围的操作空间。

表6.2-7 各种探伤方法要求的条件

探伤方法	对探伤空间位置的要求	对探测表面的要求	对探测部位的背面要求
射线探伤	要有较大的空间位置，以满足射线机头的放置和调整焦距的要求	表面不需机械加工，只需清除影响显示缺陷的东西；要有放置铅字码、铅箭头和透度计的位置	能放置暗盒
超声波探伤	要求较小的空间位置，只需放置探头和探头移动的空间	要有探头移动的表面范围，尽可能作表面加工，以利于声波耦合	用反射法探伤时，背面要求有良好的反射面
磁粉探伤	要有磁化探伤部位撒放磁粉和观察缺陷的空间位置	清除影响磁粉聚积的氧化皮等污物，要有探头工作的位置	
渗透探伤	要有涂布探伤剂和观察缺陷的空间	要求清除表面污物	若用煤油探伤，背面要求有涂煤油的空间，并要求清除妨碍煤油渗透的污物

为了充分暴露接头内部缺陷存在情况，探伤前需根据工件的几何形状和接头形式来选择照射方向，并按此方向正确地放置暗盒（俗称贴底片）。一般说，对接接头最适于射线探伤，通常一次照射即可；而T形接头和角接头的角焊缝有时需要从不同方向多次照射才不致漏检。图6.2-14中左面所示的接头对X射线探伤并不适应，如果改成右面所示的接头，则最理想。

(2) 适于超声波探伤的焊接接头

在焊接生产的超声波探伤中，以接触法应用最多。按需要可使用（纵波的）直探头或（横波的）斜探头。探伤时，探头放在探伤表面上通过耦合剂声波进入工件内，按反射情况来判断缺陷的存在。这种探伤法对探伤面要求较高，其表面粗糙度 R_a 不大于20 μm。探头在面上移动，需按焊件厚度确定探头移动区的大小。对图6.2-15所示的对接接头，按JB 1152—1981，其探头移动区尺寸由表6.2-8中公式确定。

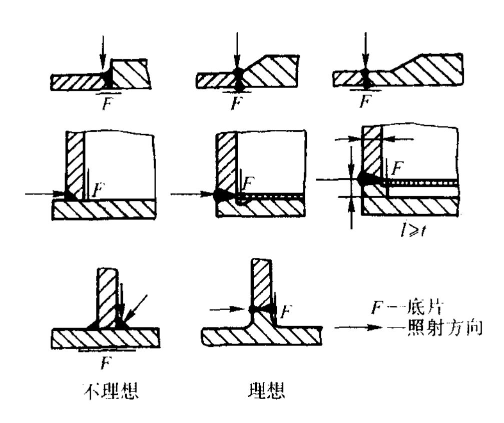


图 6.2-14　适于射线探伤的焊接结构设计

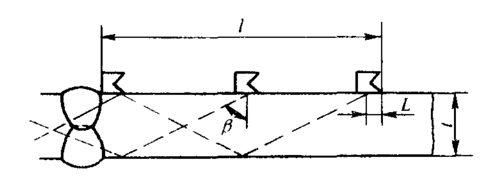


图 6.2-15　对接接头超声波探伤的探头移动区

表 6.2-8　探头移动区尺寸的确定

板厚范围/mm	探头移动区尺寸计算公式	说　明
8~46	$l \geqslant 2tK + L$	探伤面在内壁或外壁焊缝的两侧
>46~120	$l \geqslant tK + L$	探伤面在内外壁焊缝的两侧

注：l 为探头移动区尺寸，mm；t 为被探件厚度，mm；L 为探头长度，一般为 50 mm；K 为斜探头折射角 β 的正切值，可按板厚确定。

板厚 t/mm	8~25	>25~46	>46~120
K 值	3.0~2.0	2.5~1.5	2.0~1.0

对于不同厚度两焊件对接焊缝的探伤，如图 6.2-16 所示的接头设计，其探头移动区最小尺寸 l 可参照表 6.2-9 中确定。对于图 6.2-17 所示的接头其最小的探头移动区尺寸可按表 6.2-10 确定。

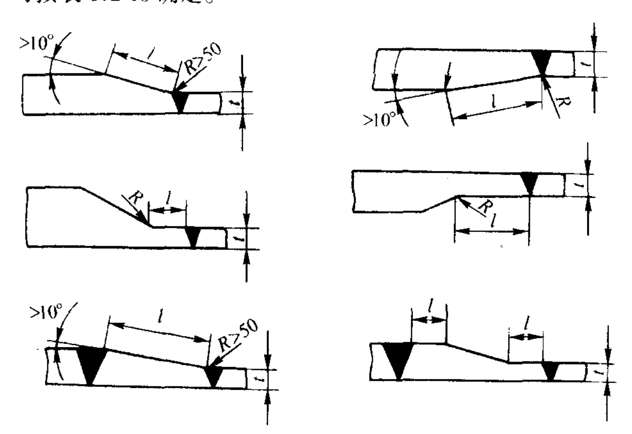


图 6.2-16　不同厚度对接接头超声波探伤的探头移动区

表 6.2-9　不同厚度对接接头焊缝超声波探伤探头移动区最小尺寸

板厚/mm		$10 \leqslant t < 20$	$20 \leqslant t < 40$	$t \geqslant 40$
探头折射角		70°	60°	45°，60°
探头移动区/mm	$l_{外面}$	$5.5t + 30$	$3.5t + 30$	$3.5t + 50$
	$l_{里面}$	$0.7l_{外面}$	$0.7l_{外面}$	$0.7l_{外面}$

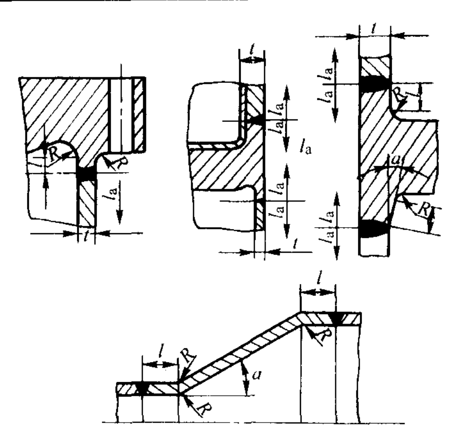


图 6.2-17　几个压力容器筒体焊接接头超声波探伤的探头移动区

表 6.2-10　压力容器筒体焊缝超声波探伤探头移动区最小尺寸[1]

板厚 t/mm	$R + l$	l	l_a
≤40	$1.5t$	$1.0t$	$3t$
>40	$1.0t$	$0.7t$	$2t$

4　焊接结构设计中的细部处理

焊接结构设计过程中，除了必须重视结构的总体设计外，还必须认真地进行结构的细部处理。这是由焊接结构自身特点所决定的，也是大多数焊接结构破坏事故的经验教训中得出的结论。焊接接头是一个性能不均匀体，与母材相比它仍然是薄弱环节。设计时就必须认真地考虑焊缝的布置，只要有可能都应避开结构上的危险断面或危险点；焊接是刚性连接，对应力集中特别敏感，而焊接结构中造成应力集中的因素很多，在确定构件形状和尺寸的强度和刚度计算中，常常为了简便忽略了应力集中，而按平均应力来计算。焊接结构的断裂破坏多数就是从被忽略的应力集中点开始的。因此，减少或消除应力集中的结构细部设计与一般强度计算同样重要。焊后未经消除残余应力的结构对脆断、腐蚀和疲劳等有影响，而在结构强度和刚度计算时也被忽略了。因此，在设计焊态下使用的焊接结构时，要注意焊缝不能过于密集、减小结构的刚度、避免有拘束状态下焊接的焊缝等。

焊接结构设计细部处理不仅可提高结构使用的安全性，而且也可简化制造工艺、节约用材和降低成本，取得更高的经济效益。例如，本篇第 2 章图 6.2-19 中所示单向受拉十字接头的两种设计，图 6.2-19a 设计之所以不合理，在于让焊缝传力，成为工作焊缝，对它必须进行强度计算；或选用与母材等强的焊接材料并开坡口保证熔透；焊后对焊缝还必须进行探伤；中间立板工作时还可能产生层状撕裂等。图 6.2-19b 的设计使角焊缝变为联系焊缝，不必进行强度计算，对焊接材料无严格要求，焊脚可减小且不必熔透，不用探伤，制造过程变得非常简单而容易，所以它是合理的设计。

下面从不同角度举一些例子，有些例子是从正、反面作比较。

4.1　考虑受力合理的细部设计

结构上集中力作用点需考虑让该力合理地传递（或分散）到整体结构上，使之整体承载。增加局部刚性和增大传



力面积是最基本的结构措施。

(1) 注意局部刚性不足引起变形

图6.2-18示出在工字梁上设置吊耳的不同结构处理。图中上面的设计不合理，工作时会引起局部变形（图中虚线所示）。图下面为改进设计，力的传递得到改善。

图6.2-19为工字柱与工字梁垂直连接的两种连接结构，在力矩 M 的作用下，图6.2-19a的设计会引起工字柱翼板局部变形（如虚线所示），A 点出现拉应力峰值，可能开裂。图6.2-19b的设计比较合理，只需在局部变形处增设肋板，并把受拉的梁上翼板与柱连接的T形接头改用熔透焊缝，以改善焊缝受力。

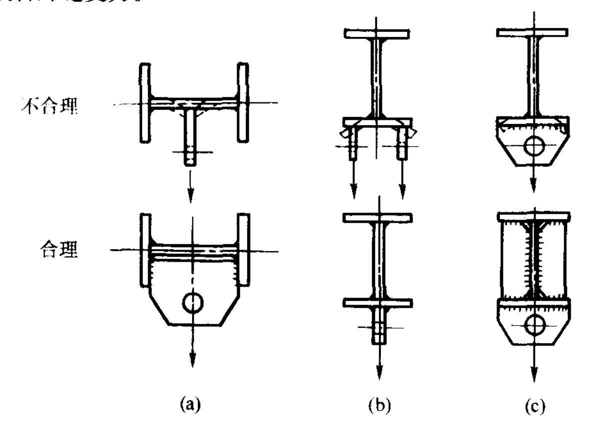


图6.2-18　工字梁上吊耳的设置

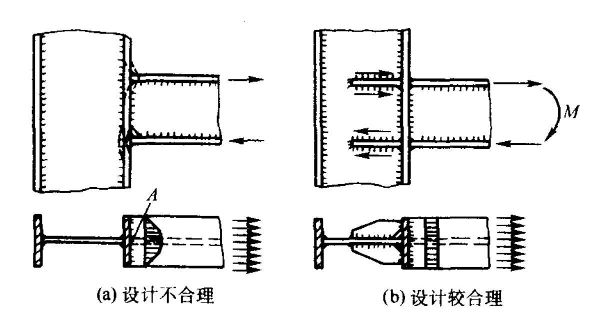


图6.2-19　工字柱与工字梁垂直连接的结构设计

图6.2-20为在箱形梁侧面的腹板上焊两个托架，用以支承空气压缩机部件。图6.2-20a为原设计，由于承重较大，且集中作用，于是在托架下部的腹板上产生裂纹。图6.2-20b增加了肋板焊缝长度，图6.2-20c在肋板对应腹板的内侧设一肋板，均可改善力的传递。

图6.2-21a为薄壁容器支座的设计，因局部刚性不足，易引起像虚线所示的局部变形。图6.2-21b在支座上方增加一块厚度较大的垫板，既增加了局部刚性，又使力的传递分散和均匀。

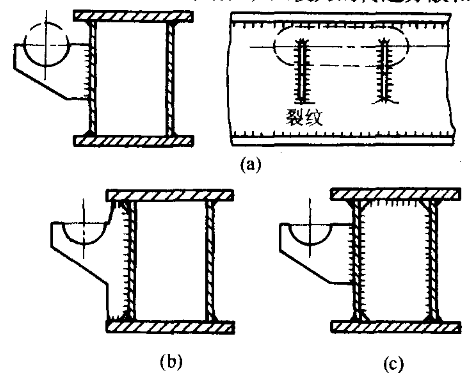


图6.2-20　箱形梁侧面焊接托架的设计

(2) 改善焊缝受力的设计

焊接结构设计时，避免焊缝受力是一条基本原则。不可避免时，也应力求减少或改变其受力性质。

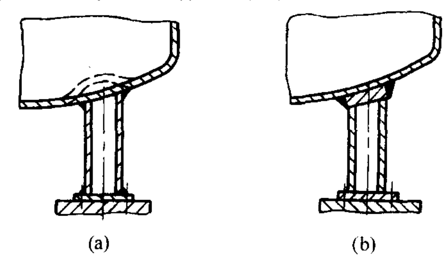


图6.2-21　薄壁容器支座的设计

1）尽可能把焊缝布置在工作应力最小的地方。工字梁（或箱形梁）上下盖板长度不足时，通常用对接缝接长，其焊缝的位置一般应避免恰好落在弯矩最大的截面上。若腹板也有对接焊缝，也不宜所有对接缝都位于同一截面上，而应当相互错开。图6.2-22a受力的工字梁，应避免图6.2-22b的设计，图图6.2-22c的焊缝布置比较好。

图6.2-23a为方箱形容器，内壁均匀受压时，四条角焊缝承受最大弯矩，见图6.2-23b，因而这种设计不合理。改用图6.2-23c的设计，四条焊缝变成对接焊缝，且位于弯矩为零的部位，避开了拐角处的应力集中区域，因而是合理的结构设计。

2）改变焊缝受力的性质或大小。能把工作焊缝改变成联系焊缝这是最理想的设计。对于工作焊缝可以根据结构的具体情况改变它的受力性质和大小。通常焊缝金属的承载能力，最好的是受压，其次是受拉，最弱的是受剪。因此，只要有可能，要避免焊缝单纯受剪。

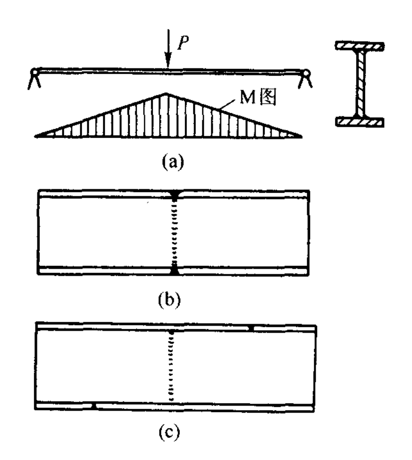


图6.2-22　焊接工字梁对接焊缝的布置

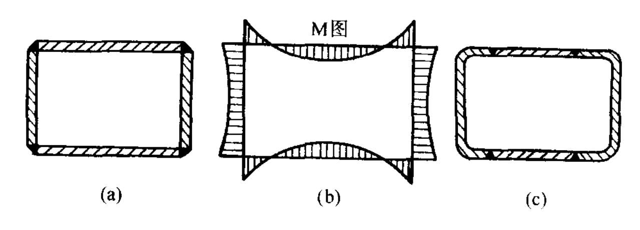


图6.2-23　方箱形焊接容器的结构设计

图6.2-24为由两根槽钢组焊成的方形截面梁，根据梁截面上的工作应力分布（如图6.2-24a所示），两条对接焊缝的位置应设置在上下（见图6.2-24b），而不是在左右两侧（图6.2-24c）。因为焊缝处于上下时，是联系焊缝。如果焊缝位于左右两侧，则焊缝为工作焊缝，受到最大的切应力。

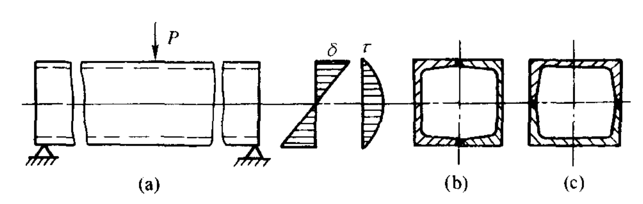


图 6.2-24 方形空心截面梁焊缝布置

图 6.2-25 为T形接头，工作时压力从立板传向平板。如果立板端面不平或其他原因，焊完两条贴角焊缝后造成端面与平板之间有间隙（见图 6.2-25a）。这时，压力 P 从立板经两角焊缝传到平板，两条角焊缝成为工作焊缝，需进行强度计算；如果立板端面与平板接合面间磨平顶紧，保证焊后接合面紧密接触（见图 6.2-25b），则工作时，压力大部分直接经接合面传递，而两角焊缝成为联系焊缝。可采用最小焊脚尺寸，而不必进行强度计算。

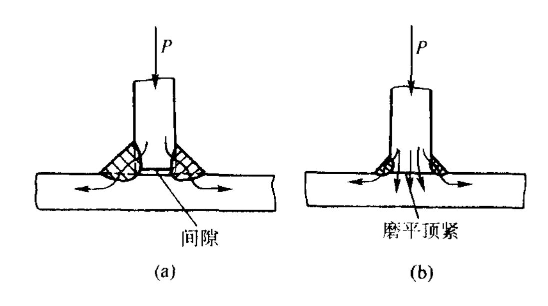


图 6.2-25 承受压力的T形接头设计

图 6.2-26 为轮辐与轮毂连接的T形接头设计的三种方案。工作时，轮辐除受到径向力外还受到图中箭头所示的轴向力作用。图 6.2-26a 的设计，左右两条环形角焊缝需传递全部轴向力，属工作焊缝，需进行强度计算；图 6.2-26b 为较好的设计，在轮毂上预先加工一个台肩。工作时，台肩直接传递了部分轴向力，因而两角焊缝的负担减轻，其焊脚尺寸可减小。这种设计还具有装配定位方便的优点。采用这种设计时，一定要保证台肩必须正对轴向力；图 6.2-26c 所示的设计，使两条角焊缝变成联系焊缝，因而可以采用最小焊脚尺寸。从承载角度这是最合理的设计，但零件多，制造工艺比较复杂。

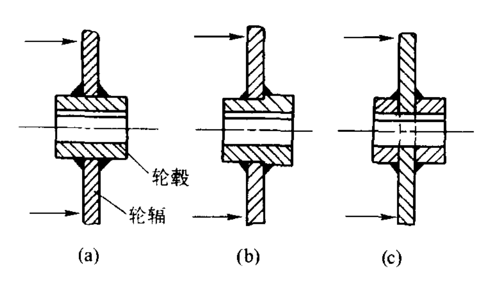


图 6.2-26 轮辐与轮毂的焊接接头设计

对于大型焊接飞轮，工作时轮辐只受到径向离心力。这时轮辐和轮毂的T形接头按图 6.2-26a 或图 6.2-26b 的设计均不理想。因为存在根部未焊透，且与离心力方向垂直，焊缝受剪。若按图 6.2-27 设计，轮辐开半边V形坡口单面焊透，这时焊缝受拉，承载能力获得提高。台肩处焊透与否已不重要，因与离心力平行。从焊缝受力看，图 6.2-26c 的设计最为理想。

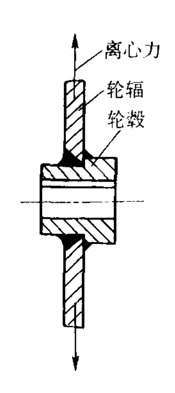


图 6.2-27 受径向力的轮辐与轮毂的接头设计

4.2 避免或减小应力集中的结构细部处理

结构不连续、截面上出现突变或力流在构件内发生转折都是应力集中点。在脆性转变温度以上工作的一般静载焊接结构，可以不必对这些应力集中点作特意处理。但由强度高，对缺口很敏感的材料制作的焊接结构，厚壁的或低温工作的焊接结构，以及在动载荷下工作的焊接结构，由于它们发生的破坏一般不是平均应力，而是局部应力引起，因此，必须从结构设计上以及在焊接工艺上避免或降低应力集中。前面在表 6.2-6 中列举了许多避免或减少应力集中的细部处理的例子。这里主要补充对焊接接头自身存在的应力集中时如何处理。

正常的或标准的焊缝，其表面应力集中点出现在焊趾处。图 6.2-28a 为正常的对接接头，由于余高不可避免，于是在箭头所指的焊趾处产生程度不同的应力集中。图中已示出三种消除或降低这种接头应力集中的处理方案。图 6.2-28b 把余高去掉，与母材平齐，彻底消除了应力集中；图 6.2-28c 只在焊趾处用砂轮打磨使焊趾处具有圆弧过渡；图 6.2-28d 是沿焊趾进行钨极氩弧堆焊或氩弧重熔，此法不仅降低了应力集中，还改善了该部位的材质。

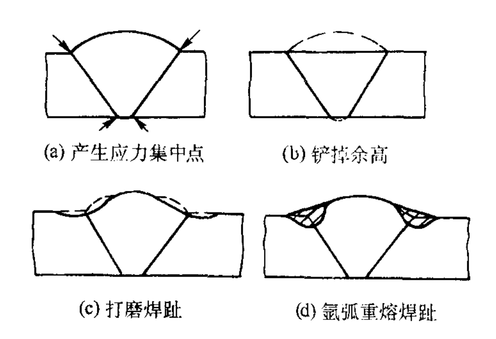


图 6.2-28 对接焊缝焊趾应力集中降低措施

具有角焊缝的接头，表面的应力集中点也在焊趾处。凹面角焊缝具有最低的焊趾应力集中，在动载荷下应优先选用这种焊缝；应避免有凸度的角焊缝。降低凸度角焊缝焊趾应力集中的方法主要是对焊趾作磨削，加工成圆弧状，类似图 6.2-28c；搭接接头角焊缝设计时，最好采用不等腰的角焊缝，尽可能减小焊缝表面与板面之间的斜角，以降低焊趾处的应力集中。

设计大型焊接机体或机架结构时，常遇到铸钢件须与轧制板材连接。通常两者厚度相差悬殊，常构成T形接头，焊缝恰好落在结构截面急剧变化部位（即应力集中区）。这样的T形接头必须根据实际情况作不同的细部设计。图 6.2-29 示出四种不同的设计方案，图 6.2-29a 施工最简易和经济，但因贴角焊缝应力集中因素多，只适于静载的或不重要的结构上；图 6.2-29b 为开坡口且保证熔透的T形接头，焊缝属

于应力集中较小的坡口焊缝（对接焊缝），具有较高的疲劳强度。若焊缝表面向母材有较大 R 圆弧过渡，则疲劳强度可进一步提高。上述两方案共同缺点是焊缝位于结构截面急剧变化部位，是应力集中区；厚大铸钢件散热快，焊接质量不易控制。图 6.2-29c 的设计是铸钢件预先作出具有较大 R 的凸台，该凸台与钢板对接。这样的设计使焊缝避开结构截面突变部位；焊缝变成应力集中小的对接焊缝；对焊缝修整或探伤要比贴角焊缝容易；钢板与凸台对接焊，两侧热量比较均衡，易保证焊接质量；在铸钢件上预制凸台与 R 圆角并不困难，不会增加很大成本。所以，承受动载情况下工作的重要焊接结构宜采用图 6.2-29c 的结构。图 6.2-29d 的设计与图 6.2-29c 具有相同的工作特性和优点。由于它的"凸台"是在母材上加工出两个圆形沟槽后形成的，所以适用于平表面的铸钢件、铸件或厚钢板。缺点是对截面有所削弱。

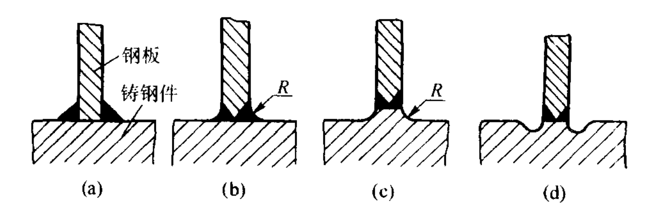


图 6.2-29　铸钢件与钢板的 T 形接头的设计方案

4.3　焊接结构中肋板设计的细节处理

焊接结构中的肋板可以提高结构的整体和局部刚性，可以改善力在结构上的传递等，因而被广泛采用。如何配置肋板已在上节叙述。由于它不是结构的主体，通常又不作强度计算，极容易忽视它的细节处理。常因细节处理不当，引起一些始料不到的问题。

肋板通常是垂直于被加强的主板平面上，构成 T 形接头，由两条贴角焊缝连接。肋板厚度一般按被加强主板厚度的 60% 左右来确定，角焊缝的焊脚尺寸约取肋板厚度的 70%。

肋板的细节处理主要是指它的形状和尺寸的确定，以及与主板之间连接的角焊缝（常称肋板焊缝）设计。图 6.2-30 为两种肋板的设计。图 6.2-30a 为不合理的设计，问题出在图中箭头所指部位处理不当。图中肋板 1 和肋板 2 的制备困难，尤其肋板 2 即使用数控切割制出与角钢形线吻合的边缘也是很困难的，因为角钢以及它与平板连接的两条角焊缝的形状和尺寸具有不确定性，很难保证肋板的装配质量；具有尖锐棱角的肋板，尖端处焊接时很难保证质量，在结构上该处易于形成应力集中；两条肋板角焊缝与主板角焊缝构成互相垂直汇交的三向焊缝，汇交点焊接质量难以保证，还构成该点处于三向应力状态。图 6.2-30b 的设计，主要把肋板上的锐角切钝，留出立边，直角处倒角避开主体的角焊缝或圆角。这样的肋板既易于剪切，也易于气割备料。当焊接肋板角焊缝时，可以在端部立边处进行围焊，避免应力集中。表 6.2-11 为三角形肋板周边尺寸参考数据。

工字形梁工作时上部受压，下部受拉，为了防止翼板和腹板失稳通常使用横向肋板加强，如图 6.2-31a 所示。在静载下，肋板可按图 6.2-31a 的设计。如果承受交变载荷，如吊车梁，则肋板设计要考虑防止疲劳破坏问题。吊车梁工作时，下翼板承受拉应力，不存在压曲失稳问题。但肋板与下翼板之间的角焊缝与该拉应力垂直，对疲劳强度有不利影响。为了消除这种不利因素，通常肋板与下盖板之间不焊，如图 6.2-31b 所示。重要结构为了提高局部刚性，可以采用图 6.2-31c 的结构，在肋板与下翼板之间加一块小垫板。它与肋板焊接，与下翼板接触但不焊。工字梁支座处的横向肋板与梁中部的横向肋要求不同，因它传递较大的支反力，因此，肋板与下翼板接触的端面应刨平顶紧并用角焊缝焊牢，见图6.2-32。

箱形梁内需设置横向肋板时，也应按上述原则进行设计。

图 6.2-33 为一铁路桥梁中两个结点结构的细部处理的例子。因桥梁工作条件恶劣，需防止可能发生疲劳和低温脆断事故，故对消除应力集中的要求特别严格。该设计在焊缝汇交处对肋板不是倒角处理，而是开圆形孔以保证各部位都是过渡圆滑，无任何产生应力集中的刻槽存在。

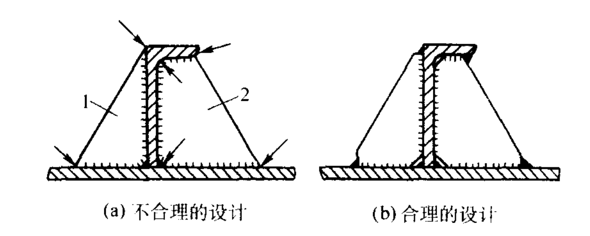


图 6.2-30　肋板设计中的细节

表 6.2-11　三角肋板的尺寸　　mm

肋板厚	l	m	n
$t<6$	$a+2t$	$\geqslant 1.5a+2$	t
$6\leqslant t<12$	$a+1.5t$		
$t\geqslant 12$	$a+t$		

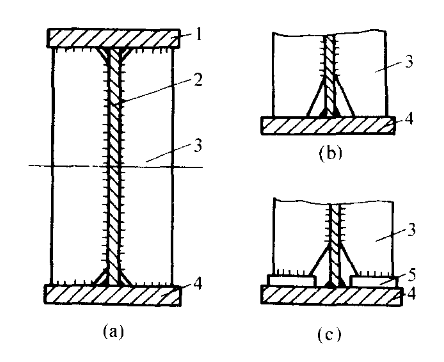


图 6.2-31　工字梁横向肋板的设计

1—上翼板；2—腹板；3—横向肋板；4—下翼板；5—小垫板

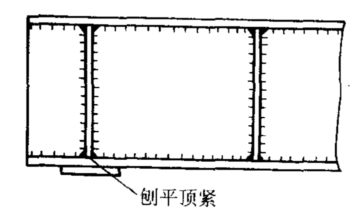


图 6.2-32　梁支座处的横向肋板

4.4　防止层状撕裂的结构措施

层状撕层主要是在焊接过程中产生，多发生在角接头、T形或十字形接头的热影响区或远离热影响区的母材金属中，裂纹呈阶梯状，基本平行钢板轧制表面，见图 6.2-34。这种裂纹从外观难以觉察，有时用超声波检查也不易发现，具有潜在危险。

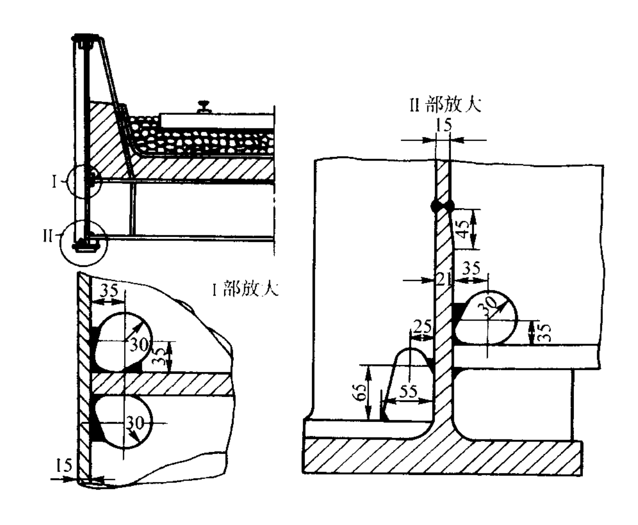


图 6.2-33　铁路桥梁节点肋板的细部处理

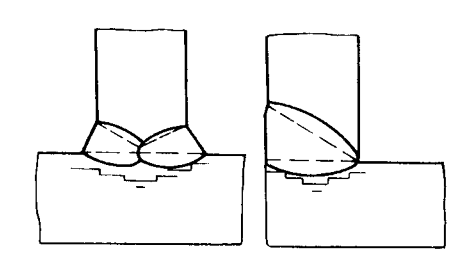


图 6.2-34　焊接接头的层状撕裂形态特征

引起层状撕裂原因主要是母材存在层状夹杂物，尤其含硫量较高，造成厚度方向（常称Z向）塑性低，其次是厚度方向拉力过大，该拉力多因焊接时受拘束引起。因此，防止层状撕裂需从选材、结构设计和焊接工艺三方面采取措施。

首先应选用具有较好抗层状撕裂性能的钢材，现国内外都发展Z向钢。我国《海上固定平台入级与建造规范》标准规定Z向钢分三级：Z15、Z25和Z35，它们的Z向断面收缩率 φ_z 分别为15%、25%和35%。一般是按板厚和结构的重要性来选用，板越厚或大型重要焊接结构应选用 φ_z 值高的材料，普通焊接结构 φ_z 在15%已满足要求，但像采油平台，船用高强钢板要求较高。国产WFG-36Z、WFG-E40和D36等钢，其 φ_z 均在40%以上，已满足需要。

在结构设计和焊接工艺方面主要是避免或减少焊接时沿母材板厚方向的收缩应力（或拘束应力）。表6.2-12列出防止层状撕裂的结构和工艺措施。为了防止图6.2-19b所示工字柱和工字梁垂直连接处的柱翼板产生层状撕裂，可以改成图6.2-35的结构，把梁上受拉的上翼板延伸到工字柱内兼起肋板作用。这样的结构受力是合理的，角焊缝原是工作焊缝变成联系焊缝，可用小焊脚尺寸。

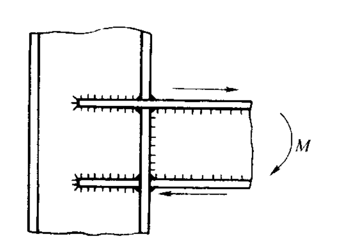


图 6.2-35　工字柱与工字梁垂直连接的结构

表 6.2-12　防止层状撕裂的结构措施

序号	易产生层状撕裂的结构	可改善的结构	说　明	序号	易产生层状撕裂的结构	可改善的结构	说　明
1			箭头所示的方向为焊接时可能出现拘束应力作用的方向	3			避免板厚方向受焊缝收缩力的作用
2		(0.3～0.5)t t	通过开坡口或改变焊缝的形状来减少厚度方向的收缩应力，一般应在承受厚度方向应力的一侧开坡口	4			为了减少接管在板厚方向的拘束应力



续表 6.2-12

序号	易产生层状撕裂的结构	可改善的结构	说　明	序号	易产生层状撕裂的结构	可改善的结构	说　明
5			在保证焊透的前提下，坡口角尽可能小；在不增加坡口角的情况下尽可能增大焊脚尺寸，以增加焊缝受力面积，降低板厚方向的应力值	7			这是压力容器中接管与壳体的连接，采用镶入件进行开孔补强的结构，同时也可避免层状撕裂和减少焊缝处的应力集中
6			镶入没有层状撕裂的附加件，通常采用的是轧制型材。经改善的结构设计，既避免了层状撕裂，同时又避免焊缝过于密集。有些接头已变成应力集中较小的对接接头	8		软质焊缝 软质焊缝	利用塑性好的软焊缝，以缓解母材在厚度方向的应力 上图是在待焊面上堆焊软金属过渡层；下图是在先焊侧焊一道软金属焊缝

编写：陈祝年（山东大学）



第3章　焊接接头的设计

1　概述

焊接结构是由若干零件或部件按设定的形状和位置用焊接的方法连接而成。连接零件或部件的部位称接头，因是用焊接方法连接的，故称该接头为焊接接头。焊接接头是获得结构成形的关键环节。

焊接接头把零件或部件连接成不可拆卸的整体结构后，就和零部件共同承载，于是便成为结构的组成部分，或结构的基本要素或元件。它也和被连接件一样必须满足强度和刚度的要求，不能因焊后产生应力与变形而影响到整个结构的工作性能。

焊接接头的构造形式既决定于整个制品所需的几何形状及组成该几何形状的各被连接件之间的相互位置，又决定于所选用的焊接方法。因此，制品的几何形状、被连接件之间的相互位置和焊接方法等，便是设计焊接接头构造形式的基本依据。

不同构造形式的接头，其工作性能有很大差别。充分掌握各种焊接接头的构造特点和工作特性，对正确设计、制造和使用焊接接头具有重要意义。

本章主要介绍熔焊中弧焊的接头设计，其他焊接方法的接头设计，都在本卷该焊接方法相关的篇章中介绍。

1.1　弧焊接头的基本类型

焊接结构上的接头，按被连接构件之间的相对位置及需组成的几何形状，可以归纳为图6.3-1中所示的五个基本类型。

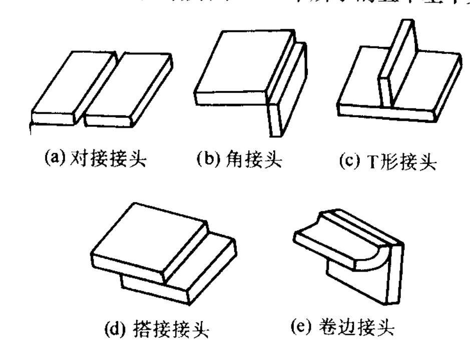


图6.3-1　焊接接头的基本类型

1.2　弧焊接头的组成

弧焊接头的类型虽各不同，但都是由焊缝、熔合线（区）、热影响区及其邻近的母材组成，见图6.3-2。

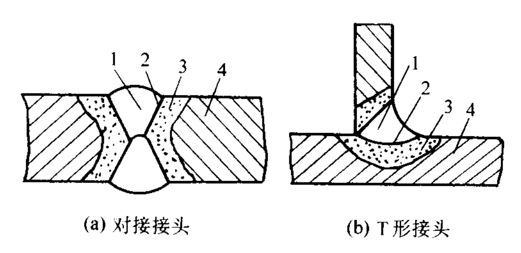


图6.3-2　焊接接头的组成

1—焊缝；2—熔合线；3—热影响区；4—母材

（1）焊缝

焊缝在接头中起着连接金属和传递力的作用。它是在焊接过程中由填充金属（当使用时）和部分母材熔合后凝固而成。焊缝金属的性能决定于这两者熔合后的成分和组织。

弧焊接头中的焊缝，按其焊前准备和截面特征可归纳成表6.3-1所列举的坡口焊缝、角焊缝和部分熔透的焊缝三种基本类型。按力传递的特点可归纳成对接焊缝和角焊缝两大类，前者力是直线传递，力流一般不发生偏转；后者力是非直线传递，力流发生偏转，见图6.3-3。

1）坡口焊缝　根据设计或工艺需要，将焊件待焊部位预加工并装配成一定形状的沟槽称坡口。在焊接过程中用填充金属填满坡口而形成的焊缝称坡口焊缝。对接接头、T形或十字接头和角接头都可以采用坡口焊缝。使接头全熔透的坡口焊缝属于对接焊缝，因其工作特性与无缝的“接头”已无区别，图6.3-3a和图6.3-3b的力流是相同的。

合理设计坡口焊缝，厚板可以熔透，还可以改变焊缝的受力性质、调节散热条件、调整熔深以改变稀释率、节省填充金属和控制焊接变形等。

2）角焊缝　在两焊件接合面所构成直交角或接近直交角处用焊接材料焊成的焊缝称角焊缝。由于焊缝的熔深浅，很像把焊缝贴在或填在交角处一样，故又称贴角焊缝或填角焊缝。角焊缝在焊前准备工作最为简单，不必作坡口加工，而且装配也较为容易。但它不是理想的传力焊缝，力线传递弯曲（见图6.3-3c），工作应力复杂，应力集中因素多。如果T形接头、十字接头和角接头的角焊缝用深熔焊工艺熔透了，便转化为对接焊缝。

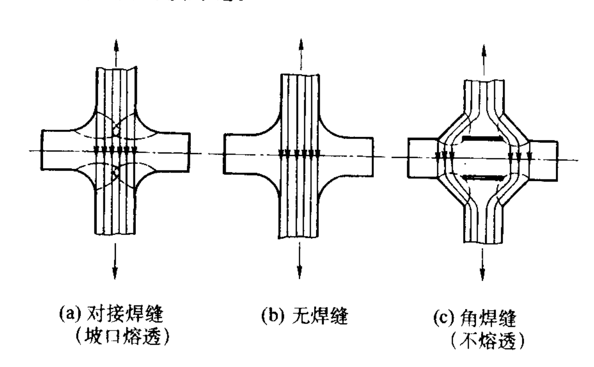


图6.3-3　对接焊缝与角焊缝传力比较

图6.3-4为坡口焊缝和角焊缝的典型形状及各部分的名称。

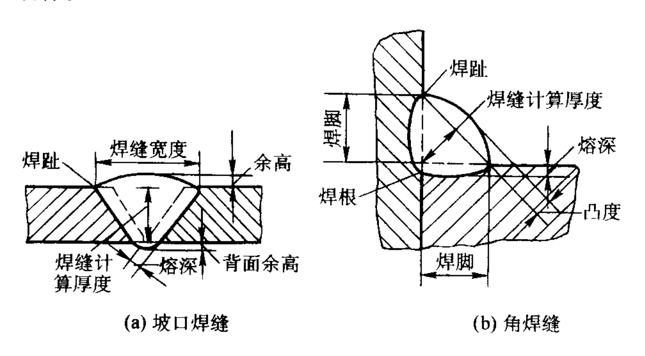


图6.3-4　典型焊缝形状及各部分名称

表 6.3-1 弧焊接头中的焊缝类型

焊缝类型		举例
坡口焊缝	对接接头	
	T形接头	
	角接头	
角焊缝	搭接接头	
	T形接头	
	角接头	
部分熔透的焊缝		

3）部分熔透的焊缝 在厚板结构的对接接头、T形（或十字）接头和角接头中，只填满预开小坡口而不全熔透的焊缝称为部分熔透焊缝，见表 6.3-1 的举例。焊前不预开小坡口，采用深熔焊工艺也能获得这类焊缝。实质上这类焊缝是对接焊缝和角焊缝的组合体。它与角焊缝比，在同样的承载能力下它可以节省填充金属。由于这类接头承载时仍具有角焊缝性质，出于安全和简便考虑，常按角焊缝进行强度计算。

（2）熔合区

熔合区是接头中焊缝与热影响区相互过渡的区域，是焊缝边界上固液两相交错地共存而后凝固的部分。此区很窄，宏观看是一条线，故又称熔合线。低碳钢和低合金钢的熔合区宽约 0.1～0.5 mm。

熔合区是焊接接头中最薄弱地带，许多焊接结构破坏的事故，常因该处的某些缺陷引起，如冷裂纹、脆性相、再热裂纹、奥氏体不锈钢的刀状腐蚀等源于此。这与该区经历热、冶金和结晶等过程，造成化学成分和物理性能极不均匀有关。

（3）热影响区

热影响区是母材受焊接热的影响（但未熔化）而发生金相组织和力学性能变化的区域，它的宽度与焊接方法及热输入量大小有关。它的组织与性能的变化与材料的化学成分、焊前热处理状态以及焊接热循环等因素有关。焊后热影响区上有可能产生脆化、硬化和软化的不利现象。图 6.3-5 为两种钢材热影响区强度与塑性的分布。说明热影响区上的力学性能是不均匀的。

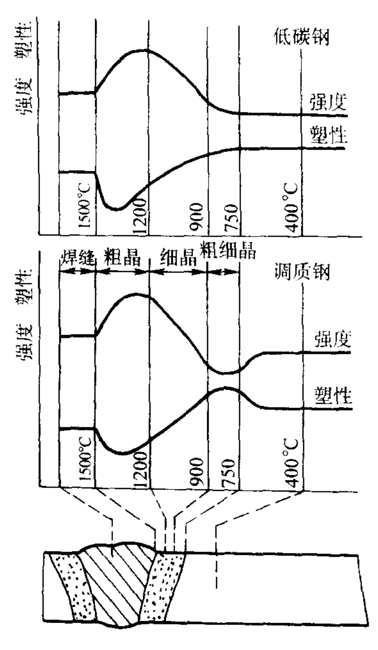


图 6.3-5 焊接热影响区强度与塑性分布示意图



1.3　弧焊接头的基本特点

依据前述弧焊接头的基本类型、接头的组成、焊缝的形式以及弧焊工艺的特点等进行综合，弧焊接头具有下列共同特点。

（1）几何不连续

当接头位于结构几何形状和尺寸发生变化的部位时，该接头就是一个几何不连续体，工作时传递着复杂的应力。即使是对接接头，只要有余高（见图 6.3-4a）存在，在焊趾处也会出现不同程度的应力集中。制造过程中发生的错边、焊接缺陷、角变形等，都将加剧应力集中，使焊头工作应力分布更加复杂。

（2）性能不均匀

焊缝金属与母材在化学成分上常存在差异，再经受不同的焊接热循环和热应变循环，必然造成焊接接头各区域的金属组织存在着不同程度的差异，就导致了焊接接头在力学性能、物理化学性能的不均匀性。

（3）有残余应力和变形

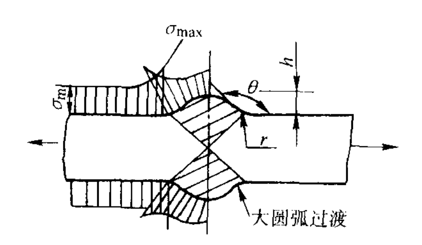
焊接过程热源集中作用于焊接的部位，不均匀的温度场便产生了较高的焊接残余应力和变形，使接头的区域过早地达到屈服点和强度极限。同时也会影响结构的刚度，尺寸稳定性及结构的其他使用性能。

2　常用焊接接头的工作特性

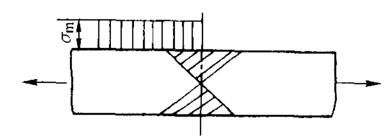
2.1　对接接头

对接接头用于连接在同一轴线上的两个金属构件，如两块等厚金属板的拼接就采用这种接头。在所有焊接接头中它的传力效率最高，应力集中最低，并易保证焊透和排除工艺缺陷。由于具有较好的综合性能，所以是重要零部件连接的首选接头。其缺点是焊前准备工作量较大，组装费工时，而且焊接变形也比其他接头为大。

对接接头工作应力分布较均匀，见图 6.3-6。应力集中产生在焊趾处。应力集中系数 K_T（$=\sigma_{max}/\sigma_m$）与焊缝余高 h、焊缝向母材的过渡角 θ 以及焊趾处的过渡圆弧半径 r 有关。增大 h，减小 r，或减小 θ，则 K_T 增大，这是不利的。如果在焊趾处加工成较大的过渡圆弧半径、则 K_T 显著降低；若削平焊缝余高 h，则没有应力集中，均可提高接头的疲劳强度。



(a)　一般接头及焊趾处加工成圆弧过渡



(b) 削平焊缝余高的对接接头

图 6.3-6　对接接头的应力分布

单面焊的对接接头，若采用焊后保留垫板的形式，见图 6.3-7，虽然在工艺上可以克服未焊透，但根部仍存在相当严重的应力集中，且易在垫板与母材的间隙中发生腐蚀。因此，这种接头不宜用于承受较大动载荷或腐蚀介质中。

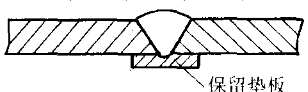


图 6.3-7　背面保留垫板的单面焊对接接头

当两块被连接板的厚度相差较大时，按 GB/T 985、GB/T 986，需将厚板削薄至与薄板厚度相同时再焊接，见图 6.3-8。为了防止因板厚不同引起作用力偏心传递，两板的中心线应尽可能重合，如图 6.3-8b。

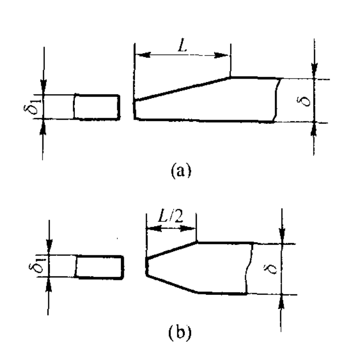


图 6.3-8　不同厚度金属板对接接头设计

$(L \geqslant 3\delta - \delta_1)$

对接接头一般采用比母材强度稍高的焊缝金属。这种强度的组配关系称高组配。一个无缺陷的高组配对接接头，在静载作用下，一般产生塑性断裂。焊趾处应力集中系数大小几乎对塑性强度没有影响，断裂发生在母材区域；对于高强度钢和大型厚板结构，采用高组配的接头，在焊接时易产生裂纹。因此，可采用焊缝金属比母材低的对接接头，这种强度的组配关系称低组配。低组配接头的强度与相对厚度 H/h 和宽厚比 W/h 有关。当 H/h 越小，W/h 越大，则接头强度就越高，见图 6.3-9。这是焊缝金属区产生的塑性变形受到强度较高的母材区拘束的缘故。因此，采用低组配对接接头，需选择合适的相对厚度和宽度比，接头的强度才能接近母材。由于采用低强度焊缝，提高了抗裂性能，故可以降低高强度钢的焊接预热温度，改善劳动条件。但抗断裂研究发现，用比母材略高的高组配接头构成软夹硬的系统而具有较高的极限裂纹尺寸。

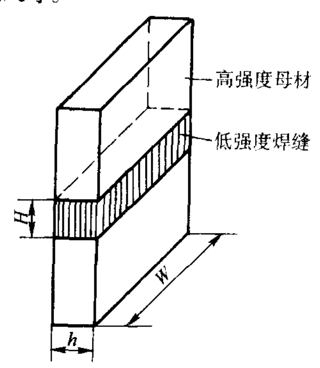


图 6.3-9　低组配对接接头

2.2　搭接接头

搭接接头是两构件部分地相互搭置，用角焊缝进行连接的接头。这种接头缺点较多：接头处构件形状发生较大变化，其应力集中比对接接头复杂；母材和焊接材料的消耗较大；接头的动载强度较低；搭接面间有间隙，若外露则易发生腐蚀，若封闭则不能在高温工作。但这种接头焊前准备工作量较少，装配较容易，对焊工技术水平要求较对接接头



低，且焊接的横向收缩量也较小。因此，在工作条件良好的和不重要的焊接结构中获得使用。图 6.3-10 为搭接接头的基本形式。

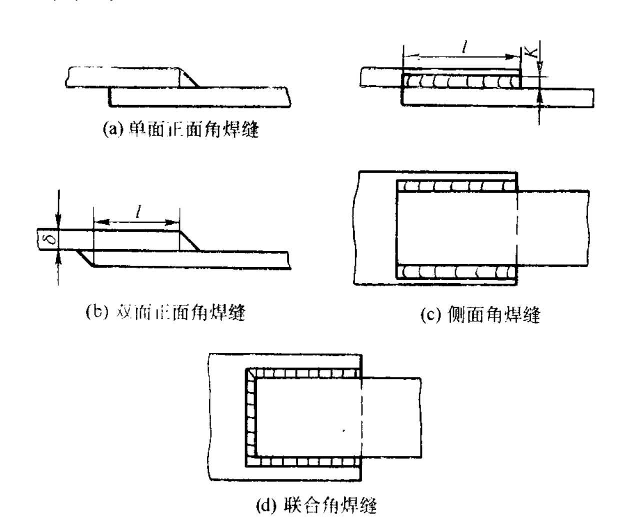


图 6.3-10 搭接接头的基本形式

搭接接头受到轴向（拉或压）力作用时，垂直作用力方向的角焊缝称正面焊角缝，平行作用力方向且位于板侧的角焊缝称侧面角焊缝，介乎两者之间的称斜角焊缝。受力方向不同的角焊缝，其工作应力分布有明显差别。

正面角焊缝的应力分布如图 6.3-11 所示，以焊趾 A 和焊根 B 处的应力集中最大。减小 θ 角和增加根部熔深可降低应力集中。

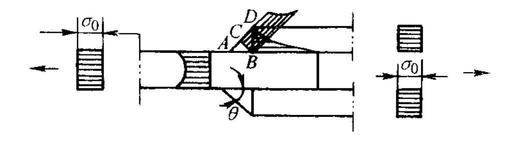


图 6.3-11 搭接接头正面角焊缝的应力分布

只有一条正面角焊缝的搭接接头，见图 6.3-10a，强度低，只要有可能都应在背面加一条焊缝，如图 6.3-10b。当背面的焊缝无法施焊时，可采用锯齿状焊缝，见图 6.3-12，这有助于提高接头强度。图 6.3-10b 所示的搭接接头，正面角焊缝与作用力偏心。承受轴向力时，接头上产生附加弯曲应力，使应力集中加剧。为了减少该弯曲应力，两条正面角焊缝之间的距离 l 应不少于其板厚的 4 倍，见图 6.3-13。

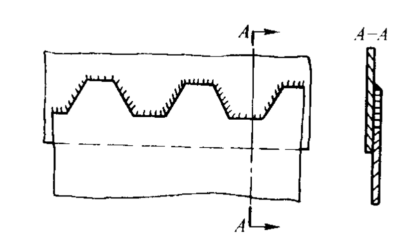


图 6.3-12 锯齿状焊缝的搭接接头

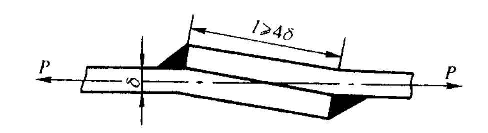


图 6.3-13 正面搭接接头的弯曲变形

侧面角焊缝搭接接头受轴向力作用时，见图 6.3-14(a)，焊缝上的切应力 τ 呈不均匀分布，应力的最大值在焊缝的两端。应力集中系数 K_T 的大小与 l/K 和 σ/τ 有关。l/K 和 σ/τ 越大，应力集中越严重。所以侧面角焊缝搭接接头设计，其搭接长度 l 不宜大于 40 K（动载时）或 60 K（静载时），K 为侧面角焊缝的焊脚尺寸。

正面和侧面角焊缝同时使用的联合搭接接头，见图 6.3-14b，有助于改善接头应力分布不均匀的现象。在 $A—A$ 截面上母材正应力分布较只有侧面角焊缝的均匀，焊缝最大切应力 τ_{max} 也降低。正面角焊缝比侧面角焊缝刚性大，变形小，它分担大部分外力，故有了正面角焊缝，侧面角焊缝的长度可缩短。但增大正面角焊缝，对提高接头的疲劳强度作用不大，有时还会降低。

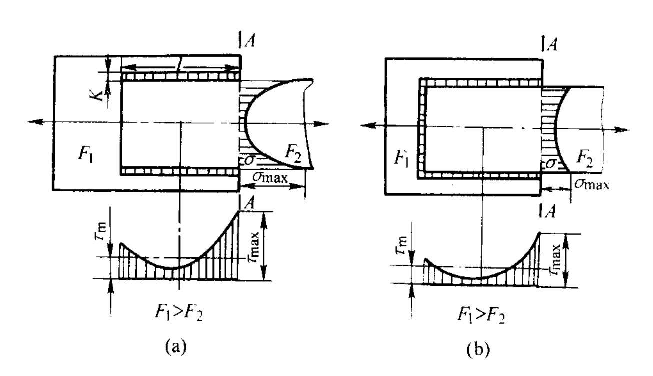


图 6.3-14 侧面和联合角焊缝搭接接头的应力分布

两平板通过与盖板搭接来实现对接的接头，称盖板接头。它又分单面盖板接头和双面盖板接头。这是模仿铆接或栓接的一种接头形式，对焊接结构来说不推荐采用这种接头，尤其在动载荷下疲劳强度极低。图 6.3-15 为这种接头的应力分布。从图中看出，仅有侧面角焊缝的盖板接头应力分布极不均匀，而增设了正面角焊缝其应力分布得到改善。

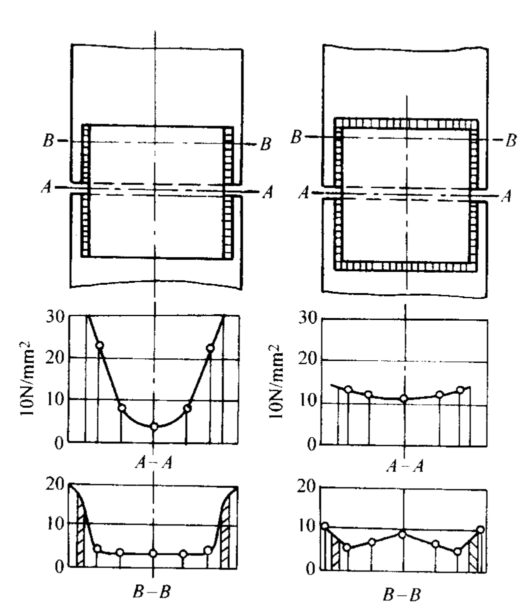


图 6.3-15 加盖板搭接接头的应力分布

2.3　T形接头和十字接头

一板件的端面与另一板件之平面构成直角或近似直角的接头，称T形接头，又称丁字接头。三件正交组成十字形的接头，称十字接头。这两种接头工作特性决定于焊缝的熔透程度。如果立板两侧是熔深浅的贴角焊缝，焊缝传递立板的拉力或压力时，其力线发生很大扭曲，未焊透的焊缝根部产生严重的应力集中；如果是带凸度的角焊缝，则在焊趾处也产生较严重的应力集中，造成整个接头极不均匀的应力分布，见图6.3-16a所示。立板开坡口并焊透的接头，焊缝根部的应力集中已不存在，这时的角焊缝转变为对接焊缝。立板上的轴向力大部分经熔透的那部分焊缝金属直接传递到横板上去，贴角那部分焊缝金属传力作用已很小，可以大大提高接头强度，见图6.3-16b。因此，对重要结构，尤其是在动载下工作的T形或十字接头应开坡口或用深熔焊使之焊透，并在贴角处形成应力集中小的凹度角焊缝。

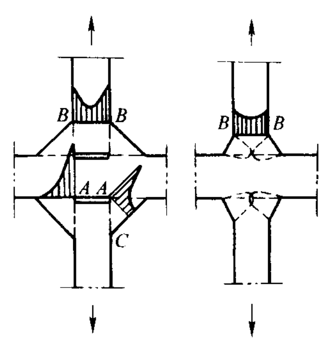


图6.3-16　十字接头的应力分布

部分熔透的T形接头，其焊缝是由坡口焊缝和角焊缝两者组成（见图6.3-17)。这种焊缝根部的应力集中依然存在。但是，当熔深 P 较大时，作用在立板上的轴向力几乎不通过角焊缝的 K 处而直接从坡口焊缝的 P 处传递到横板上，因而可提高接头强度。对于计算厚度相同的T形或十字接头，采用部分熔透焊缝比采用不熔透的贴角焊缝有利。或者说，强度相同的T形或十字接头，部分熔透接头所用的焊缝尺寸（或填充金属量）可减小。但需加工坡口的费用。

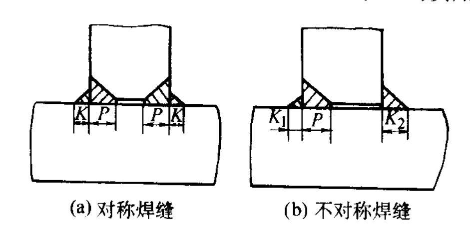


图6.3-17　部分熔透的T形接头

角焊缝的几何形状和尺寸对焊趾处（图6.3-16a 中 B 点）的应力集中系数有很大影响，图6.3-18的关系说明对于工作焊缝该处的应力集中随焊趾角度的减小而减小，也随焊脚尺寸 K 的增大而减小。而对于联系焊缝在 B 点的应力集中则随焊脚尺寸 K 的增大而增大。

T形或十字接头应尽量避免在其板厚方向承受高拉应力，因为轧制的板材常有夹层缺陷，易产生层状撕裂，尤其厚板更应注意。最好的设计是将工作焊缝转化为联系焊缝，如图6.3-19所示。如果两个方向都受拉力，则宜采用圆形、方形或特殊形状的轧制或锻制插入件，如图6.3-20所示。

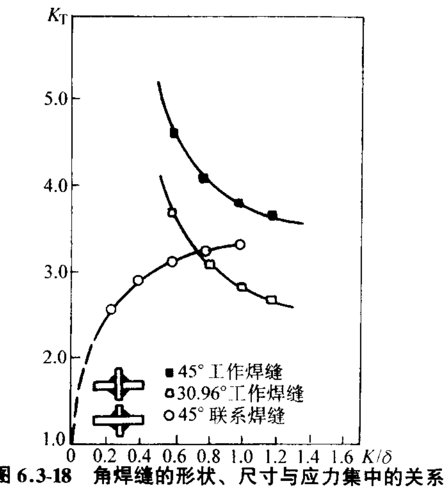


图6.3-18　角焊缝的形状、尺寸与应力集中的关系

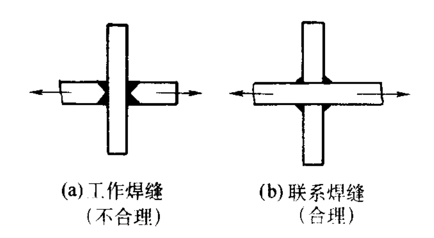


图6.3-19　单向受拉十字接头的设计

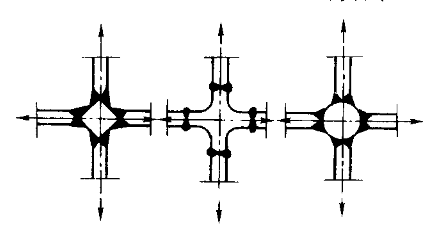


图6.3-20　双向受拉十字接头的设计

2.4　角接接头

角接接头独立使用的承载能力很低，一般都用它去连接成如箱体结构、容器结构而后起作用。常用角接头的形式见图6.3-21。图6.3-21a为最常见的形式，装配方便，省工时，是最经济的角接头；图6.3-21a~图6.3-21c仅有单面焊缝的角接头，不能承受箭头方向的弯矩；唯有图6.3-21d~图6.3-21f那样，具有双面焊缝的角接头才有较大的抗弯能力；图6.3-21g多用于厚板，焊缝尺寸小，外观平整；图6.3-21h~图6.3-21j用于不等厚板的角接头；图6.3-21b、图6.3-21d、图6.3-21e、图6.3-21j、图6.3-21k具有整齐的棱角；图6.3-21c、图6.3-21e、图6.3-21f具有良好的抗层状撕裂性能；图6.3-21k不但保证接头有正确的直角，而且接头刚性也较大，焊缝避开拐角处的应力集中区；图6.3-21l具有圆滑的圆角和和较大的刚性，大型结构可用圆管代替实心圆棒；图6.3-21m~图6.3-21o等接头适用于薄壁结构。重要结构，如压力容器等，最好采用图6.3-21m的接头，使焊缝远离弯曲部位。图6.3-21p的接头刚性大，抗扭能力强，但存在较大的应力集中，应慎重采用。

2.5　电阻点焊接头

常用的电阻点焊接头有搭接接头和加盖板的接头，见图6.3-22。这些接头上的焊点主要承受剪切应力。在单排搭接点焊的接头中，除受切应力外，还承受由于偏心力引起的拉应力。采用多排点焊时，这种拉应力较小。

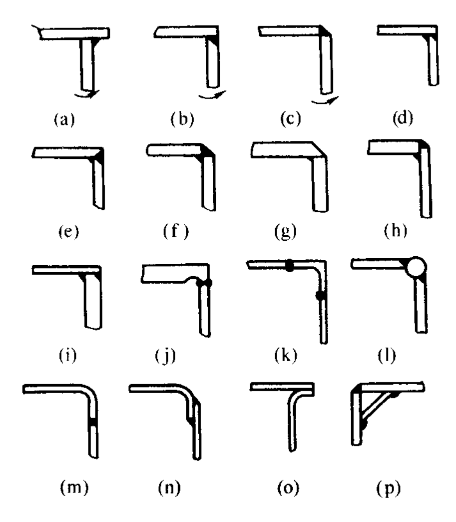


图 6.3-21　常用角接接头的形式

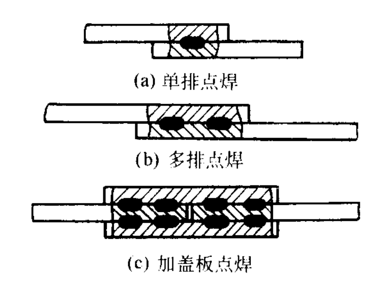


图 6.3-22　电阻点焊常用接头

在焊点区域沿板厚的应力分布是不均匀的，如图 6.3-23。这样的接头应力集中系数比弧焊搭接接头更为严重。

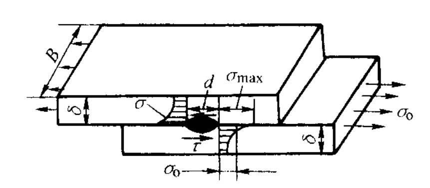


图 6.3-23　点焊接头沿板厚方向应力分布

在多排点焊接头中，各点承受的载荷并不均匀，如图 6.3-24 所示。两端焊点受力最大，中间的点受力最小。排数越多，这种分布越不均匀。因此，焊点的排数不宜过多。试验证明，多于 3 排并不能增加承载能力，故焊点排数一般不多于 3 排。

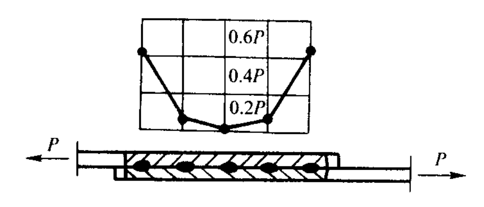


图 6.3-24　多排点焊接头焊点的受力情况

在单排点焊接头中，焊点附近的应力较密集，见图 6.3-25。密集程度与焊点间距 t 及焊点直径 d 有关。t/d 越大，则应力分布越不均匀。从降低应力集中考虑，缩小焊点间距 t 是有利的，但点焊时焊接分流大，反而降低焊点强度。单排焊点的接头是不可能达到与母材等强的，所以通常都用多排点焊。在多排中宜交错地排列焊点。

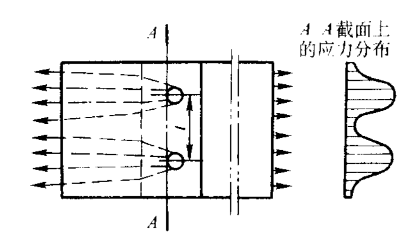


图 6.3-25　单排点焊接头宽度方向的应力分布

点焊接头的焊点承受拉力时，焊点周围产生极严重的应力集中，见图 6.3-26。说明其抗拉能力比抗剪能力低。所以设计点焊接头时，要避免受这种载荷。

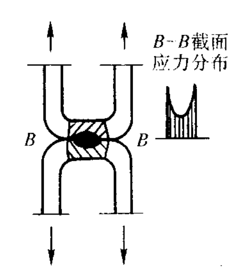


图 6.3-26　点焊焊点受撕拉时的应力分布

3　焊接接头构造的设计与选择

3.1　设计与选择焊接接头需考虑的因素

设计或选择两个待焊件之间的接头，是焊接结构设计非常重要的一环。由于焊接结构及焊接方法的多样性和结构几何尺寸、施工条件等的多变性，焊接接头构造形式和尺寸的设计与选择就会出现极大差异。合理的接头设计与选择不仅能保证结构的局部和整体的强度，还可以简化生产工艺，节省制造成本。反之，则可能影响结构的安全使用，甚至无法施焊。例如，连接两块平板，既可用对接接头也可用搭接接头，但两者的备料、焊接工艺要求、制造成本和工作特性等有显著不同；又例如，相同板厚的对接接头，用于焊条电弧焊和用于埋弧焊的坡口设计，由于两者各有工艺特点，尤其熔深不同，因而其坡口形状和尺寸不能相同；T 形接头设计，可以用贴角焊缝，又可以用坡口焊缝，但两者工作性能和制造成本却有很大差别。因此，设计与选择焊接接头的构造形式时应当从技术和经济效果综合考虑。下列是需考虑的几个主要因素。

① 产品结构形状、尺寸、材质及其技术要求。

② 焊接方法及其接头的基本特性。

③ 接头承受载荷的性质、大小，如拉伸、压缩、弯曲、交变载荷和冲击等。

④ 接头的工作环境，如温度、腐蚀介质等。

⑤ 焊接变形与控制，以及施焊的难易程度。

⑥ 接头焊前的准备和焊接所需的费用。

3.2　坡口焊缝的设计

（1）设计与选择坡口的原则

坡口焊缝的设计实际上是对接头的坡口进行设计，即确定坡口的几何形状和几何尺寸。

在对接、T 形接和角接接头中采用坡口焊缝主要的是为了保证焊透而不出现其他焊接工艺缺陷。此外，根据需要还可以利用不同的坡口形状和尺寸，或改变接头的加热或散热条件以调节焊缝的成形和结晶状态，或调整熔合比或稀释率以保证焊缝金属的内在质量，或调节和控制焊接应力与变形等。

基于焊透的目的，表 6.3-2 列出常用坡口的种类。设计

和选择这些坡口，主要依据是被焊构件的厚度、焊接方法、焊接位置和焊接工艺程序等。此外，还应尽量做到以下几点。

① 填充材料应最少。例如，同样厚度平板对接双面 Y 形坡口比单面 Y 形坡口省约一半的填充金属材料。

② 具有好的可达性。例如，有些情况不便或不能两面施焊时，宜选择单面 V 形或 U 形坡口。

③ 坡口容易加工，且费用低。V 形和双 Y 形坡口可以气割，而 U 形坡口一般要机械加工，成本较高。

④ 要有利于控制焊接变形。双面对称的坡口焊后角变形小；单面 V 形坡口焊后的角变形比单面 U 形坡口的大。

表 6.3-3 中举了几个坡口设计不当的例子。

还需注意，坡口对称的接头，其焊接过程中加热或散热条件基本上也是对称的；填充金属量大的坡口其熔合比或稀释率小。

表 6.3-2　常用坡口的类型

坡口名称	I 形坡口	V 形坡口	Y 形坡口	双 Y 形坡口	单边 Y 形坡口	双单边 V 形坡口
图　形						
符　号	‖	V	Y	X	Y	K
坡口名称	**卷边**	**U 形坡口**	**U 形坡口带钝边**	**双 U 形坡口带钝边**	**J 形坡口带钝边**	**双 J 形坡口带钝边**
图　形						
符　号	ノ乀	U	Y	X	Y	K

表 6.3-3　熔焊接头坡口设计的例子

项　次	圆棒对接	厚与薄板角接	法兰角接	三板 T 字接
不合理				
合理			或	
说明	棒端车成尖锥状，对中及施焊困难，削成扁凿状即可改善	坡口应开在薄板侧，既节省坡口加工费用，也节省填充材料	上图填充金属多，筒壁可能层状撕裂、焊缝位于加工面上	上图易引起立板端层状撕裂

(2) 坡口的设计

对接接头、T 形接头和十字接头均可采用坡口焊缝。对接接头的坡口既可以在两焊件待接边缘上加工出来，也可以只在一个焊件的待接边缘上加工出来；T 形接头或十字接头的坡口只能在立板的待接边缘上加工出来。

当按前述原则选定坡口的基本形状后，设计的主要工作就是确定坡口的坡口角度、根部间隙、钝边和根部半径等几何参数。

焊条电弧焊时，为了保证焊条能够接近接头根部，并能在焊接时使侧边熔合良好，坡口角度与根部间隙之间要有一定关系，即当减小坡口角时根部间隙必须增大。但注意，坡口角减小，可减少填充金属；而增大间隙，却增加填充金属。图 6.3-27 列出四种均符合工艺要求的对接坡口形式，研究发现，板厚 $\delta < 20$ mm时，用大坡口角度和小根部间隙，$\delta > 20$ mm时，用小坡口角度和大根部间隙的坡口形状才是经济的。

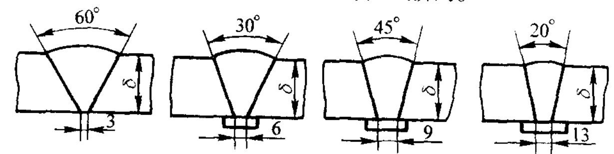


图 6.3-27　焊条电弧焊对接坡口角度与根部间隙的关系

根部间隙过小，根部难以焊透，并需采用较小规格的焊条，从而降低焊接效率；若根部间隙过大，虽然应用衬垫可保证焊接质量，但需用较多的填充金属，从而提高焊接成本，并增大焊接变形。

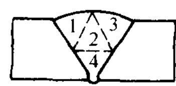


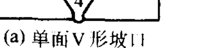
熔化极气体保护焊由于焊丝细，且使用特殊导电嘴，可以实现厚板（>200 mm）I形坡口的窄间隙（<10 mm）的对接焊。

开坡口的接头，不留钝边的坡口称锐坡口。锐坡口接头在背面无衬垫情况下焊接第一层焊道时极易烧穿，而且需用较多的填充金属，故一般都留钝边。钝边的高度以既保证熔透又不至烧穿为准。焊条电弧焊V形或U形坡口的钝边一般0~3 mm，双面V形或U形坡口取0~2 mm。埋弧焊的熔深比焊条电弧焊大，故钝边可适当加大以减小填充金属。留钝边的接头，根部间隙的大小主要决定于焊接工艺与焊接位置。在保证焊透的前提下，间隙尽可能小。平焊时，可允许用较大的焊接电流，根部间隙可为零；立焊时根部间隙宜大些，焊厚板时可在3 mm以上。在单面焊背面成形操作工艺中根部间隙一般留得较大，约与所用焊条的直径相当。背面有永久性衬垫时，应取消钝边，因为这时的钝边会减小接头根部与衬垫之间的熔合。

J形或U形坡口上常作出根部半径，主要是为了在深坡口内焊条或焊丝能接近焊缝根部，并降低第一层焊道的冷却速度，以保证根部良好的熔合和成形。焊条电弧焊时，根部半径一般取 $R=6\sim8$ mm，随板厚增加和坡口角减小而适当增大。

若条件允许，厚板结构宜设计或选用双面开坡口的焊缝。图6.3-28所示为板厚相同的单面V形坡口焊缝和双面Y形坡口焊缝填充金属需要量的比较。双面Y形焊缝不仅比单面V形焊缝少用一半的填充材料，而且可作两面交叉焊接，把焊接角变形控制到最小。





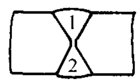


图6.3-28　单面V形与双面Y形坡口接头填充金属量的比较

背面无衬垫的对接接头，在钝边部位常有未焊透或夹杂等缺陷，一般都要求从背面进行清根。现广泛采用碳弧气刨方法清根。清根深度应确保露出无缺陷的焊缝金属，而且清根后的沟槽轮廓形状也应便于运条施焊。

上述坡口几何参数的确定原则与方法同样适用于T形接头或十字接头的坡口，但这两类接头除了可用不同形式的坡口焊缝外，也可以用不开坡口的角焊缝连接。选择何种焊缝决定于强度要求和制造成本。在静载等强条件下，成本便成为考虑的主要因素。

图6.3-29示出T形接头的三种与母材等强的焊缝设计，它们的截面均为等腰三角形。比较这三种焊缝的截面积（填充金属量），以开双面Y形坡口焊缝最省填充金属。但这种接头需额外的坡口加工，而且焊接时要求用小直径焊条和较小的电流打底以防止根部烧穿。因此，这种坡口焊缝只在较厚板的T形接头中采用才是经济的。不开坡口的角焊缝（图6.3-29a）需消耗最多的填充金属，其优点是焊件不需特殊加工，同时可以用直径大的焊条，以大电流施焊，熔敷率高。由于贴角焊缝的填充金属量随板厚的平方而增加，所以它适用于小厚板的T形接头。图6.3-30所示资料也说明了上述结论。

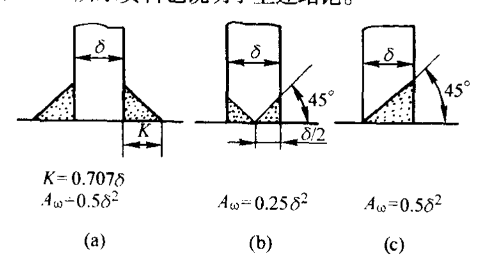


图6.3-29　T形接头角焊缝与坡口焊缝的比较

δ—板厚；K—焊脚尺寸；A_ω—焊缝总截面积

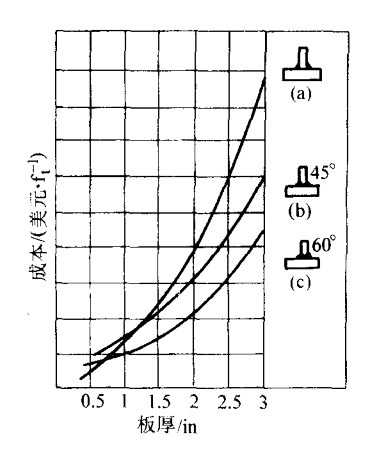


图6.3-30　T形接头中与板厚等强焊缝的相对成本

(a) 角焊缝；(b) 45°双面V形坡口；

(c) 60°双面V形坡口焊缝

1in = 0.025 m　1ft = 0.304 8 m

单面V形坡口焊缝（图6.3-29c）在经济上无优越性，唯一优点是当另一侧施焊有困难时，可以选用。它比单面贴角焊缝要安全可靠得多。T形接头中不宜用不开坡口的单面贴补角焊缝。

3.3　角焊缝的设计

实际应用的角焊缝大致有如图6.3-31所示的几种截面形状。图中 K 为焊脚尺寸，可用专用量具测出。a 为计算厚度，它是角焊缝截面内接三角形的最小高度。它代表了焊缝工作的最小截面。受载时，被认为此截面的切应力最大，是危险截面。强度设计时，a 是根据焊缝截面的几何形状按焊脚尺寸 K 导出。

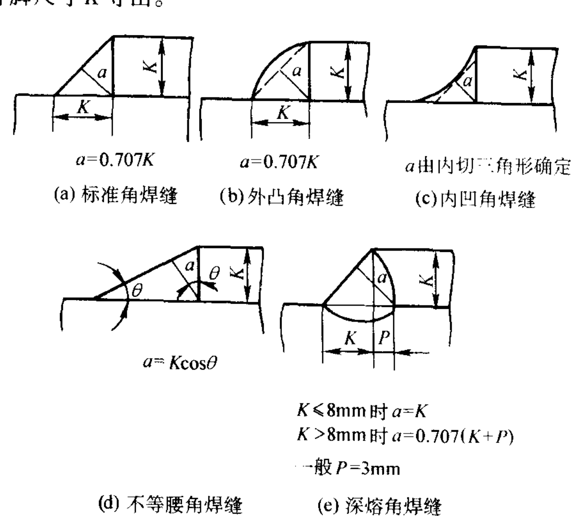


图6.3-31　常用角焊缝的截面形状及其设计截面

K—焊脚尺寸；a—计算厚度；p—熔入母材深度

图6.3-31a为等腰直角平面的角焊缝，腰角为45°，常称标准角焊缝。因静载强度相同情况下，它最省填充金属，故一般都设计此种角焊缝；普通角焊缝图6.3-31b有凸度，它是施焊中的工艺允差。虽然凸度能提高焊缝静载强度，但在计算时并不考虑它的增强作用。这种角焊缝在焊趾处应力集中严重，在动载下不应设计这种焊缝，最好设计有凹度的角焊缝图6.3-31c。它在焊趾处向母材是圆滑过渡的，应力集中很小。在“船形”位置焊接角焊缝时容易获得这种外形的角焊缝。也可以从有凸度的或标准的角焊缝中用砂轮等工具

打磨成这种有凹度的角焊缝。这种角焊缝成本较高，要获得同样计算厚度，耗材较大；不等腰角焊缝（图 6.3-31d）可改善在长腰上焊趾的应力集中，对提高接头疲劳强度有利。随着 θ 角的减小，疲劳强度就越高。这种角焊缝在静载下不宜采用。因为增加焊脚长度并不能提高静载强度，反而增加填充金属；深熔角焊缝（图 6.3-31e）是采用深熔焊条或埋弧焊工艺时获得，在不增加填充金属量情况下却增加焊缝工作截面，从而提高其承载能力，所以在计算强度时，其计算厚度要适当增加。但并不是所有金属材料都允许用深宽比大的角焊缝形状，尤其是有热裂倾向的材料要慎重。

3.4　部分熔透的焊缝设计

重型机器的焊接结构，往往为了保证具有足够的刚度而增加钢板的厚度，其实际工作应力却很小。在这种情况下构件之间的连接的焊缝一般并不需要全部熔透，而是在满足强度要求的前提下，正确地设计焊缝的形状和尺寸。

对对接接头，按强度要求确定出焊缝的有效厚度 a 后采用两面对称焊的对接接头，见图 6.3-32a。

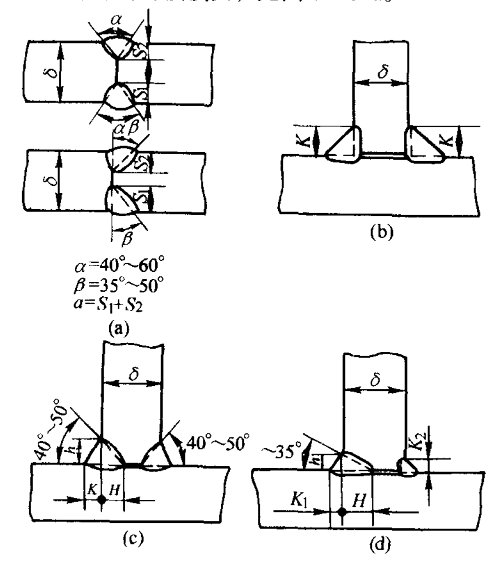


图 6.3-32　厚板部分熔透的焊接接头设计

对 T 形接头，如果是联系焊缝，则如图 6.3-32b 所示，取最小的焊脚尺寸 K，参考表 6.3-4 选用。如果是工作焊缝，在厚钢板情况下，建议采用图 6.3-32c 所示的两面开小坡口的部分熔透的角焊缝，其尺寸通过强度计算确定。

表 6.3-4　角焊缝的最小焊脚尺寸

接头中较厚板的厚度 δ/mm	最小焊脚尺寸 K/mm
$\delta \leqslant 6.5$	3.5
$6.5 < \delta \leqslant 13$	5
$13 < \delta \leqslant 19$	6.5
$19 < \delta \leqslant 38$	8
$38 < \delta \leqslant 57$	10
$57 < \delta \leqslant 152$	13
$\delta > 152$	16

注：最小焊脚尺寸 K 是对联系焊缝中角焊缝尺寸的确定。是指焊接过程中不出现工艺缺陷（如裂纹等）的最小焊脚尺寸。本表中的规定 $\delta > 152$ mm 最小焊脚尺寸为 16 mm，对于焊条电弧焊而言，必须多层多道焊，第一层散热快，仍有产生裂纹可能。这时应用低氢型焊条和较大的热输入施焊。

T 形接头上部分熔透的焊缝，实际上是坡口焊缝与角焊缝组合的焊缝。在同样承载能力下，它比图 6.3-32b 所示两面不开坡口的角焊缝能节省大量填充金属。当背面施焊不方便时，可采用图 6.3-32d 所示单面开小坡口的部分熔透焊缝，背面只焊一道按表 6.3-4 最小焊脚尺寸确定的角焊缝。

计算部分熔透 T 形接头焊缝的工作应力时，焊缝的计算厚度 a 应按图 6.3-33 所示确定。当计算工作应力有困难时，可参考一些经验数据。如图 6.3-32c 的接头，取 $H \approx 0.3\delta$，$K=\frac{1}{3}h$；如图 6.3-32d 的接头取 $H \approx 0.4\delta$，$K_1=\frac{1}{3}h$，K_2 按最小焊脚尺寸（表 6.3-4）确定。

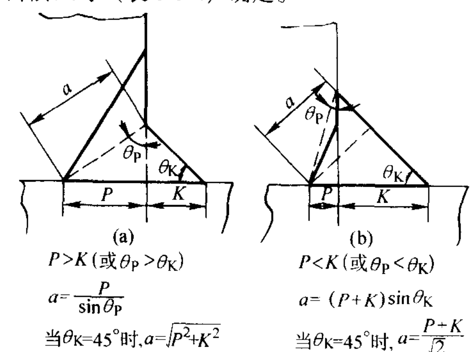


图 6.3-33　部分熔透角焊缝的计算厚度 a 的确定

3.5　标准的坡口形状和尺寸

国家标准 GB/T 985—《气焊、手工电弧焊及气体保护焊焊缝坡口的基本形式和尺寸》和 GB/T 986—《埋弧焊焊缝坡口的基本形式和尺寸》对最常用的弧焊接头坡口的设计，已作出了规定。因此，除有特殊要求焊缝的坡口需另行设计外，一般焊接结构上的焊缝坡口都可以直接从这两个标准中选用。

表 6.3-5 是摘自这两个国家标准中典型坡口形式及其适用厚度范围。

表 6.3-5　坡口形式和适用厚度范围

序号	坡口形式	符号	焊接面数	厚度范围/mm	
				手弧焊	埋弧焊
1			单面焊	1~3	6~12
			双面焊	3~6	6~24
2	3~4, δ, 20~30		单面焊	2~4	3~12
3	α, p, δ, b		单面焊	3~26	10~24
			双面焊		10~30
4	α, b, p, δ		双面焊	12~60	24~60

续表 6.3-5

序号	坡口形式	符号	焊接面数	厚度范围/mm	
				手弧焊	埋弧焊
5			单面焊	>30	>30
			双面焊		
6			双面焊	>16	20～50
7			双面焊	6～30	10～20
8			双面焊	>30	50～160
9			双面焊	>30	>30
10			双面焊	>10	20～30

4　焊接接头的静载强度计算

焊接接头的强度计算，实际上是对连接各种接头的焊缝进行工作应力的分析和计算，然后按不同准则建立强度条件，满足这些条件就认为该接头工作安全可靠。

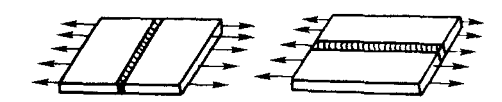
目前焊接接头强度设计的方法有许用应力设计法和极限状态设计法两种。前者应用最多，后者仅在建筑钢结构设计中使用。两者在接头上的应力分析和计算中没有本质区别，在强度表达式上也很类似，但取值的方式和方法却不相同。

4.1　工作焊缝与联系焊缝

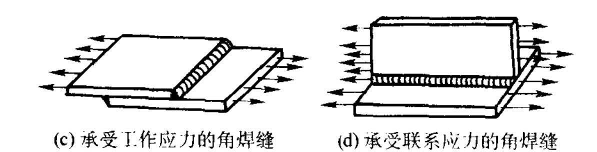
在焊接结构中的焊缝，按其所起的作用可分为工作焊缝和联系焊缝两种，见图 6.3-34 所示。

工作焊缝（图 6.3-34a 和 c）又称承载焊缝，它与被连接材料是串联的，它起着传递全部载荷的作用，焊缝上的应力为工作应力，一旦焊缝断裂，结构立即失效；联系焊缝（图 6.3-34b 和 d）又称非承载焊缝，它与被连接材料是并联的，它传递很小载荷，主要起构件之间相互联系作用。焊缝上的应力为联系应力，焊缝一旦断裂，结构不会立即失效。

设计焊接结构时，对工作焊缝必须进行强度计算，对联系焊缝不必计算。对于既有工作应力又有联系应力的焊缝，则只计算工作应力而忽略联系应力。



(a) 承受工作应力的对接焊缝　(b) 承受联系应力的对接焊缝



(c) 承受工作应力的角焊缝　(d) 承受联系应力的角焊缝

图 6.3-34　工作焊缝与联系焊缝

4.2　焊接接头的许用应力设计法

许用应力设计法的强度条件已在 1.3.1 中介绍，当接头的工作应力小于或等于许用应力，则该接头是安全的。由于对接头工作应力的分析和计算有不同的理论和方法，因而就有不同的计算公式。

4.2.1　弧焊接头静载强度计算公式

（1）简易的焊接接头强度计算方法

1）弧焊接头静载强度计算的假定　焊接接头在外力作用下，焊缝上的工作应力分布往往不均匀。特别角焊缝，在其焊趾和焊根处都出现不同程度的应力集中。要精确地计算焊缝上的应力比较困难，常根据理论研究的结果和实际使用经验，对接头作些简化和假定。然后利用工程力学的理论和方法对焊缝最小截面进行应力分析和计算。

在静载条件下当焊缝金属和母材均具有较好塑性时，可作如下假定。

① 焊接残余应力对接头强度没有影响。

② 由于几何不连续而引起局部应力集中，对接头强度没有影响；认为焊缝上的工作应力是均匀分布，以平均应力进行计算。

③ 忽略焊缝的余高和少量熔深，以焊缝中最小截面为计算截面（又称危险截面）见图 6.3-31 和图 6.3-35 所示，图中 a 为该截面的计算厚度。

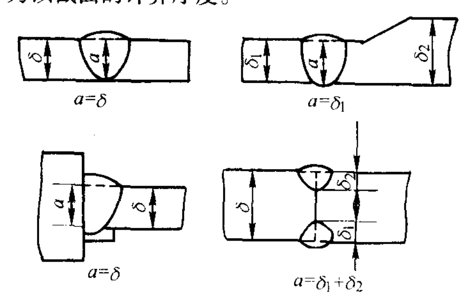


图 6.3-35　对接焊缝的计算厚度 a

④ 认为角焊缝都是在切应力作用下破坏，一律按切应力计算其强度。

⑤ 搭接接头的正面角焊缝和侧面角焊缝在强度上无差别。

按上述假定，对所有熔焊接头的焊缝强度计算都得到了简化，导出了能满足一般工程要求的简易计算公式。

2）对接焊缝的静载强度计算公式　对接接头和T形或十字形接头，无论它们预开或不预开坡口，只要是熔透了的焊缝都称之为对接焊缝。这类焊缝的静载强度计算公式列于表 6.3-6。

表 6.3-6　对接焊缝接头静载强度计算公式

名　称	简　　图	计 算 公 式	备　　注
对接接头		受拉：$\sigma=\frac{P}{l\delta}\leqslant[\sigma'_1]$	$[\sigma'_1]$—焊缝的许用拉应力 $[\sigma'_a]$—焊缝的许用压应力 $[\tau']$—焊缝的许用切应力 $\delta\leqslant\delta_1$
		受压：$\sigma=\frac{P}{l\delta}\leqslant[\sigma'_a]$	
		受剪：$\tau=\frac{Q}{l\delta}\leqslant[\tau']$	
		平面内弯矩 M_1：$\sigma=\frac{6M_1}{l^2\delta}\leqslant[\sigma'_1]$	
		平面外弯矩 M_2：$\sigma=\frac{6M_2}{l\delta^2}\leqslant[\sigma'_1]$	
开坡口熔透 T 形接头或十字接头		受拉：$\sigma=\frac{P}{l\delta}\leqslant[\sigma'_1]$	
		受压：$\sigma=\frac{P}{l\delta}\leqslant[\sigma'_a]$	
		受剪：$\tau=\frac{Q}{l\delta}\leqslant[\tau']$	
		平面内弯矩 M_1：$\sigma=\frac{6M_1}{l^2\delta}\leqslant[\sigma'_1]$	
		平面外弯矩 M_2：$\sigma=\frac{6M_2}{l\delta^2}\leqslant[\sigma'_1]$	

表中对接接头焊缝的静载强度计算公式与母材的静载强度计算公式完全相同，焊缝的计算厚度取被连接的两板中较薄的厚度（见图 6.3-35），其他焊缝长度一般取焊缝实际长度；T 形接头和十字接头的焊缝因已熔透，故按对接焊缝进行强度计算，焊缝的计算厚度取接头中立板的厚度。

一般情况下，对优质碳素结构钢和低合金结构钢中全熔透的对接焊缝，若按等强度原则选择其焊接材料（填充金属），就可以不进行强度计算。

3）角焊缝的静载强度计算公式　由角焊缝组成的接头，其焊缝的静载强度计算公式列于表 6.3-7。

表 6.3-7　角焊缝接头静载强度基本计算公式

名　称	简　　图	计 算 公 式	备　　注
搭接接头		受拉或受压：$\tau=\frac{P}{a\sum l}\leqslant[\tau']$	$[\tau']$—焊缝的许用切应力 $\sum l=l_1+l_2+\cdots l_5$
		第一种：分段计算法 $$\tau=\frac{M}{al(h+a)+\frac{ah^2}{6}}\leqslant[\tau']$$ 第二种：轴惯性矩计算法 $$\tau=\frac{M}{I_x}y_{max}\leqslant[\tau']$$ 第三种：极惯性矩计算法 $$\tau=\frac{M}{I_P}r_{max}\leqslant[\tau']$$	$I_P=I_x+I_y$ I_x、I_y—焊缝计算面积对 x 轴、y 轴的惯性矩 I_P—焊缝计算面积的极惯性矩 y_{max}—焊缝计算截面距 x 轴的最大距离 r_{max}—焊缝计算截面距 O 点的最大距离



续表 6.3-7

名　称	简　图	计 算 公 式	备　注
T形和十字接头		拉：$\tau=\frac{P}{2ah}\leqslant[\tau']$	承受压应力时，考虑到板的端面可以传递部分压力，许用应力从 $[\tau']$ 提高到 $[\sigma_a']$
		压：$\tau=\frac{P}{2ah}\leqslant[\sigma_a']$	
		平面内弯矩 M_1：$\tau=\frac{3M_1}{ah^2}\leqslant[\tau']$	
		平面外弯矩 M_2：$\tau=\frac{M_2}{ha(\delta+a)}\leqslant[\tau']$	
		弯：$\tau=\frac{4M(R+a)}{\pi[(R+a)^4-R^4]}\leqslant[\tau']$	
		扭：$\tau=\frac{2T(R+a)}{\pi[(R+a)^4-R^4]}\leqslant[\tau']$	
		弯：$\tau=\frac{M}{I_x}y_{max}\leqslant[\tau']$	

表中角焊缝的计算长度一般取每条焊缝实际长度减去10 mm，计算厚度 a 取焊缝内接三角形的最小高度，见图6.3-31。在设计计算角焊缝时，一般应遵循下列原则和规定。

① 侧面角焊缝或正面角焊缝的计算长度不得小于 $8K$（K 为焊脚尺寸），并不小于 40 mm。

② 角焊缝的最小焊脚尺寸不应小于 4 mm。当焊件厚度小于 4 mm 时，可与焊件厚度相同。

③ 因构造上需要的非承载角焊缝，其最小焊脚尺寸可根据焊件厚度及焊接工艺要求确定，可参照表 6.3-4。

④ 在承受静载的次要焊件中，如果计算出的角焊缝的焊脚尺寸小于规定的最小值，可采用断续焊缝。断续焊缝的焊脚尺寸可根据折算方法确定。断续焊缝之间的间距在受压构件中不应大于 15δ，受拉构件中一般不应大于 30δ，δ 为被焊构件中较薄件的厚度。在腐蚀介质下工作的构件不宜采用断续焊缝。

4）部分熔透接头的静强度计算公式　部分熔透 T 形接头或十字接头的焊缝静载强度计算公式同角焊缝的计算公式，见表 6.3-7。但焊缝的计算厚度 a 应按图 6.3-33 所示来确定。部分熔透的对接接头，其焊缝强度因传递轴向力的力线发生弯曲，出于安全，也按角焊缝计算，所用公式见表 6.3-8。

表 6.3-8　部分熔透对接接头焊缝强度计算公式

名　称	简　图	计 算 公 式	备　注
部分熔透对接接头		拉：$\tau=\frac{P}{2al}\leqslant[\tau']$	V形坡口： $\alpha\geqslant60°$时，$a=S$ $\alpha<60°$时，$a=0.75S$ U形、J形坡口：$a=S$ $I_x=al(\delta-a)^2$ l—焊缝长度
		剪：$\tau=\frac{Q}{2al}\leqslant[\tau']$	
		弯：$\tau=\frac{M}{I_x}y_{max}\leqslant[\tau']$	

5）复杂载荷下焊接接头的静载强度计算 当焊接接头承受复杂载荷时，应分别求出各载荷所引起的应力，根据各应力的方向、性质和位置，确定合成应力最大的点，即危险点，并算出该点的合成应力。当危险点难以确定时，应选几个大应力点计算其合成应力，以最大值的点为危险点。最大正应力和最大切应力不在同一点时，偏于安全的做法是以最大正应力和平均切应力计算其合成应力。

例如，图6.3-36所示，同时承受轴向力 N 和横向力 P 作用的工字型钢的T形接头，用相同截面尺寸的角焊缝连接。由于横向力 P 的作用除了产生一个力矩 $M=PL$ 外，还产生了一个剪力 $Q=P$。在这种情况下，力矩 M 及轴向力 N 由全部焊缝承担，而剪力 Q 仅由垂直的腹板焊缝承担。于是应验算工字钢翼板外侧和腹板上端两个地方的合成应力。

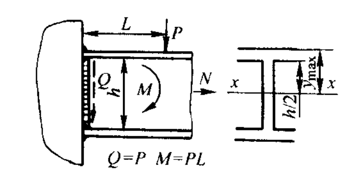


图6.3-36 承受复杂载荷的型钢焊接接头

① 翼板外侧的应力

轴向力 N 引起的应力

$$\tau_N=\frac{N}{A}$$

力矩 M 引起的应力

$$\tau_M=\frac{M}{I_X}y_{max}=\frac{PL}{I_X}y_{max}$$

合成应力

$$\tau=\tau_N+\tau_M=\frac{N}{A}+\frac{PL}{I_X}y_{max}\leqslant[\tau']$$

② 腹板上端的应力

轴向力 N 引起的应力

$$\tau_N=\frac{N}{A}$$

力矩 M 引起的应力

$$\tau_M=\frac{PL}{I_X}\times\frac{h}{2}=\frac{PLh}{2I_X}$$

剪力 Q 引起的应力

$$\tau_Q=\frac{P}{A_F}$$

合成应力

$$\tau=\sqrt{(\tau_N+\tau_M)^2+\tau_Q^2}=\sqrt{\left(\frac{N}{A}+\frac{PLh}{2I_X}\right)^2+\left(\frac{P}{A_F}\right)^2}\leqslant[\tau']$$

式中，A 为全部角焊缝的计算面积；A_F 为腹板角焊缝的计算面积；I_X 为全部角焊缝计算面积对 X 轴的惯性矩；$[\tau']$ 为焊缝金属的许用切应力。

(2) 国际焊接学会（IIW）推荐的角焊缝静载强度计算方法

表6.3-7所列角焊缝的计算公式虽然简捷方便，但因作了较多的简化和假定，从而使得计算结果不够精确，通常导致比实际强度所需的焊脚尺寸大得多的结果，这意味着要多消耗填充金属量。国际焊接学会第ⅩⅤ委员会在1976年推荐了一个建立在理论分析和试验研究基础上的角焊缝静载强度计算公式，即

$$\sigma_{zh}=\beta\sqrt{\sigma_\perp^2+3(\tau_\perp^2+\tau_\parallel^2)}\leqslant[\sigma_1']$$

式中，σ_{zh} 为折合应力；β 为因材料屈服点 σ_s 而异的系数，$\sigma_s=240\ N/mm^2$ 时，$\beta=0.7$；$\sigma_s=360\ N/mm^2$ 时，$\beta=0.85$；其他钢种可按 σ_s 值用插值法确定；$\sigma_\perp$ 为垂直于计算截面上的正应力，见图6.3-37；$\tau_\perp$ 为计算截面上与焊缝垂直的切应力；$\tau_\parallel$ 为计算截面上与焊缝平行的切应力；$[\sigma_1']$ 为焊缝金属的许用拉应力。

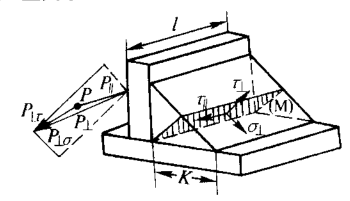


图6.3-37 角焊缝的受力分析

例如，图6.3-38所示的T形接头，承受偏心力 P，除产生一偏心力矩 M（$=PL$）外，还产生一个剪切 Q（$=P$）。

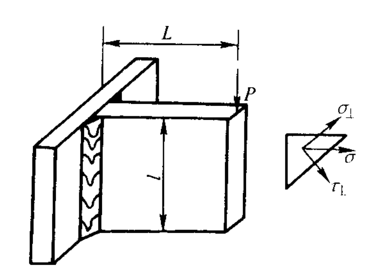


图6.3-38 T形接头受力分析

力矩 M 引起的最大弯曲应力为

$$\sigma=\frac{3PL}{al^2}$$

在计算截面上 σ 分解为

$$\sigma_\perp=\sigma\cos45°=\frac{3PL}{al^2}\frac{\sqrt{2}}{2}=\frac{3\sqrt{2}PL}{2al^2}$$

$$\tau_\perp=\sigma\sin45°=\frac{3PL}{al^2}\frac{\sqrt{2}}{2}=\frac{3\sqrt{2}PL}{2al^2}$$

剪力 Q 引起的切应力为

$$\tau_\parallel=\frac{Q}{2al}=\frac{P}{2al}$$

折合应力为

$$\sigma_{zh}=\beta\sqrt{\sigma_\perp^2+3(\tau_\perp^2+\tau_\parallel^2)}\leqslant[\sigma'_1]$$

(3) 按刚度设计选择角焊缝尺寸

按刚度设计的焊接结构，如焊接机床床身、底座、立柱和横梁等大件，一般工作应力较低。若按工作应力来设计角焊缝尺寸，其值都很小；若按等强度原则来选择焊缝，则尺寸很大，不仅增加制造成本，而且也增大了焊接残余应力与变形。因此，这类角焊缝不宜用强度条件来确定焊脚尺寸，而是按刚度条件来确定。

这里推荐经验作法：以被焊件中较薄件的强度的33%、50%和100%作为焊缝强度来确定焊脚尺寸。以T形接头的双面角焊缝为例，其焊脚尺寸 K 与立板厚度 δ 的关系为

33%强度焊缝 $K=1/4\delta$

50%强度焊缝 $K=3/8\delta$

100%强度焊缝 $K=3/4\delta$

100%强度的角焊缝就是等强度焊缝，它主要用于集中载荷作用的部位，如导轨的焊接；50%强度的角焊缝用于焊接箱体中，若为单面角焊缝，则焊脚尺寸要加倍，即 $K=3/4\delta$；33%强度的角焊缝主要用于不承载的角焊缝。当它小于最小焊脚尺寸（表6.3-4）时，则取最小焊脚尺寸。

4.2.2 电阻点焊和缝焊接头的静载强度计算

(1) 点焊接头

点焊接头工作的特点是：焊点具有较高的抗剪能力，而抗撕裂能力低。故设计时应使焊点受剪而避免受撕拉。根据



接头传递载荷大小，可设计成单点搭接和多点搭接。为了保证多点搭接接头上每个焊点的焊接质量尽可能地均匀，要注意焊点直径和焊点的排列。

1）焊点直径 d　按母材厚度 δ 确定，表6.3-9给出几种常用金属材料的最小焊点直径的参考值。也可按 $d=5\sqrt{\delta}$ 估算，式中 δ 为较小板厚。

表6.3-9　焊点的最小直径

板厚① δ/mm	焊点直径 d/mm		
	低碳钢、低合金钢	不锈钢、耐热钢、钛合金	铝合金
0.3	2.0	2.5	—
0.5	2.5	2.5	3.0
0.6	2.5	3.0	—
0.8	3.0	3.5	3.5
1.0	3.5	4.0	4.0
1.2	4.0	4.5	5.0
1.5	5.0	5.5	6.0
2.0	6.0	6.5	7.0
2.5	6.5	7.5	8.0
3.0	7.0	8.0	9.0
4.0	9.0	10.0	12.0

①　指被焊板中较薄者。

2）焊点中心距 t　焊点过密时，焊接分流大而影响焊接质量，一般 $t\geqslant 3d$，见图6.3-39。也可按表6.3-10选用。

3）焊点边距 e　为了防止焊点沿板的边缘处撕开，焊点中心至板端距离 $e_1\geqslant 2d$；为了防止焊点熔核被挤出，焊点中心至板侧距离 $e_2\geqslant 1.5d$，见图6.3-39。

4）最小搭接宽度　根据焊点排数确定。单排要大于边距两倍，可参照表6.3-11确定。

精确计算焊点上的工作应力较困难，为了简化计算，作如下假定。

①　每个焊点都在切应力作用下破坏。

②　忽略因搭接造成作用力偏心而引起的附加应力。

③　焊点上的应力集中对静载强度没有影响。

④　同一搭接接头上的焊点受力是均匀的。

按上述假定，得出表6.3-12所列点焊接头静载强度计算公式。

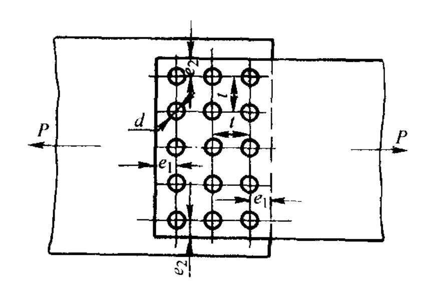


图6.3-39　点焊接头的设计

表6.3-10　点焊接头的最小焊点中心距　mm

最薄板厚	被焊金属		
	结构钢	不锈钢及高温合金	轻金属
0.5	10	8	15
0.8	12	10	15
1.0	12	10	15
1.2	14	12	15
1.5	14	12	20
2.0	16	14	25
2.5	18	16	25
3.0	20	18	30
3.5	22	20	35
4.0	24	22	35

表6.3-11　点焊接头的最小搭接宽度　mm

最薄板厚	单排焊点			双排焊点		
	结构钢	不锈钢及高温合金	轻金属	结构钢	不锈钢及高温合金	轻金属
0.5	8	6	12	16	14	22
0.8	9	7	12	18	16	22
1.0	10	8	14	20	18	24
1.2	11	9	14	22	20	26
1.5	12	10	16	24	22	30
2.0	14	12	20	28	26	34
2.5	16	14	24	32	30	40
3.0	18	16	26	36	34	46
3.5	20	18	28	40	38	48
4.0	22	20	30	42	40	50



表 6.3-12 电阻点焊接头静载强度计算公式

简 图	计 算 公 式	备 注
单面剪切 双面剪切	受拉或压 单面剪切 $\tau=\frac{4P}{ni\pi d^2}\leqslant[\tau'_0]$ 双面剪切 $\tau=\frac{2P}{ni\pi d^2}\leqslant[\tau'_0]$	$[\tau'_0]$—焊点的许用切应力； i—焊点的排数； n—每排焊点个数； d—焊点直径； y_{max}—焊点距 x 轴的最大距离； y_j—j 焊点距 x 轴的距离
	受弯 单面剪切 $\tau=\frac{4My_{max}}{i\pi d^2\sum_{j=i}^{n}y_j^2}\leqslant[\tau_0']$ 双面剪切 $\tau=\frac{2My_{max}}{i\pi d^2\sum_{j=i}^{n}y_j^2}\leqslant[\tau_0']$	

(2) 缝焊接头

设计缝焊接头主要注意焊接可达性和搭接宽度。一般是先根据焊件材质和板厚确定滚轮压痕的宽度，然后再确定搭接宽度。表6.3-13给出常用材料的滚轮压痕宽度和搭接宽度参考数据。

缝焊工作时焊缝受剪，其静载强度按下式验算（见图6.3-40）：

$$\tau=\frac{P}{bl}\leqslant[\tau_0']$$

式中，b 为焊缝宽度，可取滚轮压痕宽度；l 为焊缝长度；$[\tau_0']$ 为焊缝许用切应力。

电阻点焊和缝焊的许用切应力均按 $[\tau'_0]=0.3\sim0.5[\sigma_l]$ 选用，$[\sigma_l]$ 为低碳钢、低合金钢或铝合金的许用拉应力。抗撕拉许用应力为 $[\sigma'_0]=0.25\sim0.3[\sigma_l]$。

表 6.3-13 缝焊的滚轮压痕宽度和缝焊搭接宽度 mm

板 厚	滚轮压痕宽度 b			最小搭接宽度 L			备 注
	结构钢	不锈钢	铝合金	结构钢	不锈钢	铝合金	
0.3+0.3	3.0~4.0	3.0~3.5	—	8	7	—	
0.5+0.5	3.5~4.5	3.5~4.0	5.0~5.5	9	8	10	
0.8~0.8	4.0~5.5	5.5~6.0	5.5~6.0	11	12	12	
1.0+1.0	5.0~6.5	6.0~7.0	6.0~6.5	13	14	13	
1.2+1.2	—	—	6.5~7.0	—	—	14	
1.5+1.5	6.0~8.0	8.0~9.0	7.0~8.0	16	18	16	
2.0+2.0	8.0~10.0	9.0~10.0	8.0~9.0	20	20	18	
2.5+2.5	9.0~11.0	10.0~11.0	10.0~11.0	22	22	22	
3.0+3.0	10.0~12.0	11.0~12.5	11.0~12.0	24	25	25	
3.5+3.5	—	—	12.0~13.0	—	—	26	

图 6.3-40 缝焊焊缝强度计算

4.2.3 焊缝的许用应力

前已述及强度设计用的许用应力通常是由国家工程主管部门根据安全与经济原则，结合材料性质、载荷、环境、加工质量、计算和检测精确度以及构件的重要性等综合后确定。没有统一规定时，就凭长期设计经验加以确定。

表6.1-6列出一般机器焊接结构中焊缝的许用应力。我国起重机行业和钢制压力容器行业中采用的焊缝许用应力已有相应标准规定，分别列于表6.1-7和表6.1-8。

4.3 焊接接头的极限状态设计法

我国建筑行业中，按《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)规定，工业与民用房屋和一般构筑物的钢结构设计，除疲劳强度计算外，应采用以概率理论为基础的极限状态设计法，并用分项系数的设计表达式进行计算。



该规范对各种形式焊接接头的强度计算归纳为对接焊缝和角焊缝的强度计算。凡是在对接接头、T形接头和角接头上的焊缝，如果全熔透，则定义为对接焊缝；如果不熔透或部分熔透的坡口焊缝，则为角焊缝。计算这两类焊缝强度的表达式，在形式上和许用应力设计法相似，但含义和取值不同。载荷数值采用的是载荷设计值，它等于载荷标准值乘以载荷分项系数；位于不等式右侧的焊缝强度采用的是焊缝强度设计值，而不是焊缝的许用应力值。

4.3.1　对接焊缝的强度计算

由于这类焊缝内部熔透，不存在缝隙，其受力与母材相同，可以按母材强度公式计算这类焊缝的强度。

表6.3-14给出了常用的对接焊缝强度计算公式。

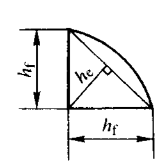
表6.3-14　对接焊缝接头的强度计算公式

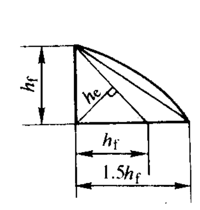
序号	连接形式及受力情况	计算内容	计算公式	备注
1		拉应力	$\sigma=\frac{N}{l_\omega t}\leqslant f_t^\omega$	当承受轴心力的板件用斜焊缝对接，焊缝与作用力间夹角 θ 符合 $\tan\theta\leqslant1.5$ 时，其强度可以不计算
2		压应力	$\sigma=\frac{N}{l_\omega t}\leqslant f_c^\omega$	
3		正应力	$\sigma=\frac{6M}{l_\omega^2 t}\leqslant f_t^\omega$	
		切应力	$\tau=\frac{1.5V}{l_\omega t}\leqslant f_v^\omega$	
4		正应力 切应力 折算应力	$\sigma=\frac{N}{A_\omega}+\frac{M}{W_\omega}\leqslant f_t^\omega$ 或 f_c^ω $\tau=\frac{VS_\omega}{l_\omega t}\leqslant f_v^\omega$ $\sqrt{\sigma_1^2+3\tau_1^2}\leqslant1.1f_t^\omega$ 式中　$\sigma_1=\frac{N}{A_\omega}+\frac{My_1}{I_\omega}$ $\tau_1=\frac{VS_{\omega1}}{I_\omega t}$	在正应力和切应力均较大的地方才需验算折算应力，如图中的1点处
5	横向加劲肋	正应力 切应力 折算应力	$\sigma=\frac{M}{W_\omega}\leqslant f_t^\omega$ $\tau=\frac{V}{ht}\leqslant f_v^\omega$ $\sigma_{fl}=\sqrt{\sigma_1^2+3\tau_1^2}\leqslant1.1f_t^\omega$ 式中　$\sigma_1=\frac{M}{W_\omega}$ $\tau_1=\frac{V}{ht}$	如梁翼缘在柱翼缘的连接处无横向加劲肋加强时，W_ω 按下式计算 $W_\omega=\frac{h^2t}{6}$

注：N、M、V 为作用于连接处的轴心力、弯矩和剪力；l_ω 为焊缝的计算长度；t 为焊缝的厚度；A_ω、W_ω、I_ω、S_ω 为焊缝截面的面积、抵抗矩、惯性矩和最大面积矩；$S_{\omega1}$ 为焊缝截面中，计算点1以上，（或以下）的面积对中和轴的面积矩；y_1 为计算点1到中和轴的矩离；h 为竖直焊缝的长度（即牛腿截面的高度）；f_t^ω、f_c^ω、f_v^ω 为对接焊缝的抗拉强度、抗压强度和抗剪强度设计值，可由表6.1-10查得。

4.3.2　角焊缝的强度计算

搭接接头、T形接头和角接头中的角焊缝分直角角焊缝（图6.3-41）和斜角角焊缝（图6.3-42），其中以直角角焊缝应用最多。图中 h_e 为角焊缝的有效厚度，h_f 为角焊缝较小的焊脚尺寸，分别相当于前面简易计算法中的计算厚度 a 和焊脚尺寸 K。有角焊缝的接头中，在被连接两母材之间存在缝隙，力的传递比熔透的对接焊缝复杂得多，所以其强度也按近似方法计算。表6.3-15给出了常用接头中直角角焊缝的强度计算公式。斜角角焊缝的有效厚度 h_e 按其焊缝内接三角形的最小高度确定。





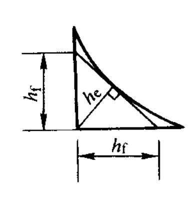
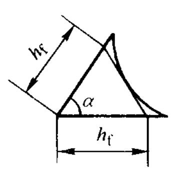
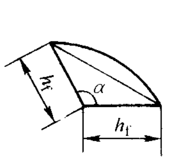


图 6.3-41　直角角焊缝截面





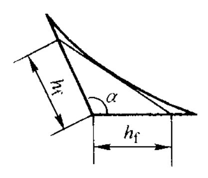


图 6.3-42　斜角角焊缝截面

由于部分熔透的对接焊缝也存在缝隙，力线并非直线传递，出于安全也与角焊缝一样计算其强度，当力平行于焊缝长度方向时，用表 6.3-15 第 1 项的公式计算；当力垂直于焊缝长度方向时，用表中第 2 项的公式计算；在其他力或各种综合作用下，在 σ_f 和 τ_f 共同作用处用表中第 5 项的公式计算。其计算厚度 a 可参照表 6.3-8 确定。

表 6.3-15　直角角焊缝的强度计算公式（摘自 GBJ 17—2002）

序号	连接形式及受力情况	计 算 公 式	备　注
1	N　N	$\tau_f=\dfrac{N}{h_e\sum l_\omega}\leqslant f_f^\omega$	$\sum l_\omega$ 为连接一侧的焊缝计算长度之和
2	N　N	$\sigma_f=\dfrac{N}{h_e\sum l_\omega}\leqslant \beta_f f_f^\omega$	
3	"2"　N "1"　N	$\dfrac{N}{h_e\left(\sum\beta_f\cdot l_{\omega1}+\sum l_{\omega2}\right)}\leqslant f_f^\omega$	$\sum l_{\omega1}$、$\sum l_{\omega2}$ 分别为连接一侧的焊缝"1"和"2"的计算长度之和
4	N　N　h_{f1}　h_{f2}	$\sigma_f=\dfrac{N}{(h_{e1}+h_{e2})\ l_\omega}\leqslant \beta_f f_f^\omega$	h_{f1} 和 h_{f2} 相差不宜过大
5	"1"　V　N　M	$\sqrt{\left(\dfrac{\sigma_f}{\beta_f}\right)^2+\tau_f^2}\leqslant f_f^\omega$ 式中 $\sigma_f=\dfrac{N}{A_\omega}+\dfrac{M}{W_\omega}$；$\tau_f=\dfrac{V}{A_\omega}$	验算应力最大的"1"点的强度。对图示焊缝情况 $A_\omega=2h_e l_\omega$ $W_\omega=\dfrac{1}{3}h_e l_\omega^2$
6	1+　V　M　1+　"1"　"2"　x　y_2　x　1-1	$\sigma_{f1}=\dfrac{M}{W_\omega}\leqslant \beta_f f_f^\omega$ $\sigma_{f2}=\sqrt{\left(\dfrac{\sigma_{M2}}{\beta_f}\right)^2+\tau_f^2}\leqslant f_f^\omega$ 式中　$\sigma_{M2}=\dfrac{M}{I_{\omega x}}y_2$ $\tau_f=\dfrac{V}{A'_\omega}$	验算"1"点和"2"点的强度，如连接在翼缘处无柱中横向加劲肋加强时，则只有梁腹板处的竖直焊缝传力，此时，焊缝可按项次 5 的情况计算
7	1　e　Q　1　"1"　1-1	$\sigma_{f1}=\sqrt{\left(\dfrac{\sigma_{M1}}{\beta_f}\right)^2+\tau_f^2}\leqslant f_f^\omega$ 式中　$\sigma_{M1}=\dfrac{Qe}{W_{\omega1}}$；$\tau_f=\dfrac{Q}{A'_\omega}$	

续表 6.3-15

序号	连接形式及受力情况	计　算　公　式	备　　注
8		焊缝"1"点处 $\sigma_{f1}=\sqrt{\left(\frac{\sigma_{M1}}{\beta_f}\right)^2+\tau_{f1}^2}\le f_f^w$ 式中　$\sigma_{M1}=\frac{Q}{A_\omega}+\frac{Qex_1}{I_{\omega P}}$ $\tau_{f1}=\frac{Qey_1}{I_{\omega P}}$ 焊缝"2"点处 $\sigma_{f2}=\sqrt{\left(\frac{\sigma_{M2}}{\beta_f}\right)^2+\tau_{f2}^2}\le f_f^w$ 式中：　$\sigma_{M2}=\frac{Qey_1}{I_{\omega P}}$； $\tau_{f2}=\frac{Q}{A_\omega}+\frac{Qex_2}{I_{\omega P}}$	
9		$\sigma_{f1}=\frac{Qe}{W_\omega}+\frac{Q}{A_\omega}\le\beta_f f_f^w$	验算右侧两角点以下各项次中的焊缝几何特性如下 $W_\omega=\frac{1}{3}h_e l_\omega^2$ $A_\omega=2h_e l_\omega$
10		$\tau_f=\frac{Q}{A_\omega}\left(1+\frac{2e}{h}\right)\le f_f^w$	验算右侧焊缝
11	若$l\geqslant 3h$时	$\sigma_{f1}=\sqrt{\left(\frac{\sigma_{M1}}{\beta_f}\right)^2+\tau_f^2}\le f_f^w$ 式中　$\sigma_{M1}=\frac{Qe}{W_\omega}$； $\tau_f=\frac{Q}{A_\omega}$	验算4个角点
12	若$h\geqslant 3l$时	$\sigma_f=\sqrt{\left(\frac{\sigma_M}{\beta_f}\right)^2+\tau_f^2}\le f_f^w$ 式中　$\tau_f=\frac{Q}{A_\omega}$；$\sigma_M=\frac{2Qe}{hA_\omega}$	验算4个角点

注：h_e（h_{e1}、h_{e2}）为角焊缝的有效厚度，等于$0.7h_f$（$0.7h_{f1}$、$0.7h_{f2}$）；h_f（h_{f1}、h_{f2}）为角焊缝的较小焊脚尺寸（见图6.3-41）；l_ω为一条焊缝的计算长度，除围焊缝外，由焊缝的实际长度减10 mm求得；围焊缝的两水平肢，每条焊缝减5 mm，竖直肢取为焊缝原长；W_ω、$W_{\omega 1}$为焊缝有效截面对边缘和对"1"点的抵抗矩；A_ω、A'_ω为焊缝有效截面面积和腹板连接焊缝（竖直焊缝）的有效截面面积；$I_{\omega p}$为焊缝有效截面对其形心O的极惯性矩，其值为：$I_{\omega p}=I_{\omega x}+I_{\omega y}$；$I_{\omega x}$、$I_{\omega x}$为焊缝有效截面绕$x$轴或$y$轴的惯性矩；$y_2$为计算点"2"到中和轴的距离；$\sigma_f$、$\tau_f$分别为按焊缝有效截面计算的垂直于焊缝长度方向的正应力和沿焊缝长度方向的切应力；f_f^w为角焊缝的强度设计值，可由表6.1-10查得；β_f为正面角焊缝的强度设计值增大系数：静载或间接动载，$\beta_f=1.22$，直接受动载$\beta_f=1.0$。



4.3.3 焊缝的强度设计值

GBJ50017—2003 对表 6.3-14 和表 6.3-15 中各计算公式右侧的焊缝强度设计值已作出规定，见表 6.1-10。

5 焊接接头的疲劳强度计算

5.1 概述

用于抗疲劳设计的方法有名义应力疲劳设计法、局部应力应变分析法、损伤容限设计法和疲劳可靠性设计等，各有不同的应用范围。本节主要介绍名义应力疲劳设计法，因为它的历史悠久，仍然是目前用得最多、最为成熟的一种设计方法，故又称常规疲劳设计法。它是以名义应力（用材料力学方法，不计缺口或其他应力集中处几何形状不连续性的影响，按净截面积计算出的正应力 σ 或切应力 τ）为基本设计参数，以 $S-N$ 曲线为主要设计依据的抗疲劳设计方法。它适用于高周疲劳，属于许用应力设计法类型。基于这种疲劳强度设计法，对焊接接头作如下的分析与计算。

焊接接头的疲劳强度受接头形式、焊缝形状、焊接工艺及其缺陷和受力方向等因素的影响。

焊接接头中的工艺缺陷，如裂纹、夹渣、未熔合、未焊透、气孔等使接头的疲劳强度显著下降，其影响程度与缺陷的种类、尺寸、方向和位置有关。表面缺陷（如咬边、根部未焊透等）比内部缺陷（如气孔、夹渣等）的影响大；片状缺陷（如与作用力方向垂直的裂纹、未熔合、未焊透等）比带圆角的缺陷（如气孔等）的影响大；缺陷位于残余拉应力场中所引起疲劳强度的下降比位于残余压应力场中的大；而位于应力集中区的缺陷（如焊趾处的裂纹）引起疲劳强度的下降比在均匀应力区的缺陷大。对受横向拉伸的对接接头，如果板厚相同，错边量越大，则疲劳强度越低；若错边量相同，板越厚，则疲劳强度降低越小。对于角接头，具有根部间隙的接头比无根部间隙的接头的疲劳强度要低。

对于无缺陷的致密的对接接头，焊后未经加工的，其疲劳强度与焊缝余高 h、焊趾处的圆弧半径 R 和焊缝向母材的过渡角 θ 有关，h 越大，R 和 θ 越小，疲劳强度越低。若将焊缝的余高削平，其疲劳强度与母材相同或稍低。若在焊趾处加工成大圆弧半径过渡，则可明显提高疲劳强度。在平焊和横焊位置施焊的焊缝，有好的外形和高的疲劳强度；仰焊焊缝的疲劳强度最低；垂直施焊焊缝的疲劳强度居中。

搭接接头的疲劳强度通常低于对接接头。正面角焊缝接头的疲劳强度与焊缝形状有关，加大角焊缝的底边与高的比值并加工焊趾处使之圆滑过渡，可在一定程度内提高接头的疲劳强度。加盖板的搭接接头，把盖板端部在厚度和宽度上加工成斜面，见图 6.3-43，有利于提高接头的疲劳强度，但必须与改善正面角焊缝的形状结合起来方能取得好效果。加工侧面角焊缝的过渡区对提高疲劳强度的效果不大。

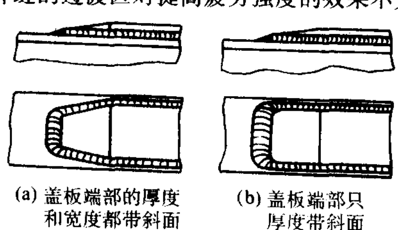


图 6.3-43 改善搭接接头疲劳强度的方法

焊缝承受工作应力的十字接头，如果未开坡口或熔深不足，其疲劳断裂可能发生在两个薄弱环节：焊趾区域（见图 6.3-16a 中的 $B-B$ 截面）和根部间隙处（即图 6.3-16a 中的 $A-A$ 截面）。未开坡口又无熔深的十字接头，在轴向力作用下，如焊脚尺寸 K 与板厚 $K/\delta<0.4\sim0.5$，一般断裂在焊缝上；当 $K/\delta>0.4\sim0.5$，则一般断裂在焊趾处。对带坡口或具有一定熔深的十字接头，K/δ 的临界值随熔深的增加而降低。十字接头的焊缝为联系焊缝时，其疲劳强度高于工作焊缝的接头。

带连续角焊缝的疲劳强度高于断续角焊缝。用埋弧焊焊成的均匀直通焊缝的疲劳强度比用焊条电弧焊焊成的在分段处连接不良的焊缝的疲劳强度高。

任何一条承载焊缝，承受垂直其轴线的正应力比承受平行其轴线的正应力的疲劳强度低；在同样的受力情况下角焊缝的疲劳强度比对接焊缝的低很多，因为前者力流偏转而对缺口更为敏感。对于非承载焊缝，也要注意母材的受力方向，焊缝轴线垂直母材拉应力方向的焊缝疲劳强度一般比平行母材拉应力方向的焊缝低。但平行母材拉应力方向的非承载焊缝不能有垂直拉应力方向的平面型缺陷。

电阻点焊接头在动载下，往往在紧靠焊点的母材处沿母材开裂，其疲劳强度相当低。点焊接头的疲劳强度与接头形式、焊点的布置（指单排或多排）以及板厚有关。双面加盖板的点焊接头（图 6.3-22c）的疲劳强度较高，单排搭接点焊接头较低（见图 6.3-22a）。薄板接头比厚板的高。

焊接残余应力对接头疲劳强度的影响与应力循环特征 r、应力水平、接头的应力集中系数和残余应力的分布有关。当残余拉应力区有应力集中时，对疲劳强度有很不利的影响。随着 r 值的增加，残余应力的影响逐渐降低。

提高焊接接头疲劳强度主要有如下措施。

1）降低应力集中　选择合理的结构形式和焊接接头形式，如避免构件截面有突变。在选择焊接接头时，应优先选用应力集中小的对接接头；选择合适的焊缝形状和尺寸，如减小焊缝余高，焊趾处有平滑过渡等；合理地布置焊缝，尽量使焊缝避开高工作应力区；可以把原角焊缝设计改为对接焊缝，图 6.3-44 为典型的例子。必须采用角焊缝时，可采取综合措施提高接头的疲劳强度，如采用有凹度的角焊缝，而避免有凸度的角焊缝，或者用机械加工方法使焊趾处具有较大的圆弧过渡。

对接接头由于有焊缝余高的存在，使焊趾处产生应力集中，容易出现疲劳裂纹。把该余高削去是最好的办法，对焊趾处加工成大半径圆弧过渡也是好措施。此外，用钨极氩弧焊在焊趾处重熔一遍，见图 6.3-45，不仅能使焊缝金属圆滑过渡，减小该处的应力集中，又能减少和消除该部位的非金属夹杂物，对提高接头疲劳强度很有效。

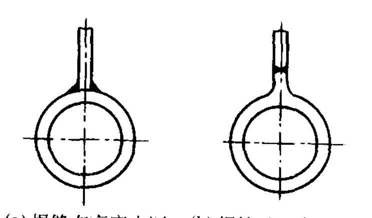


图 6.3-44 焊缝避开高应力区的设计

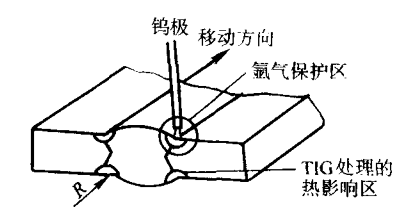


图 6.3-45 焊趾处钨极氩弧重熔整形



2）调整焊接残余应力的分布　焊后产生焊接残余应力是不可避免。压残余应力可提高疲劳强度，而拉残余应力降低疲劳强度。因此，若能调整构件表面或在应力集中处存在压残余应力，就能提高疲劳强度。

例如，通过调整施焊顺序、局部加热等都有可能获得有利于提高疲劳强度的残余应力场。图 6.3-46 所示工字梁对接接头，对接焊缝 1 受弯曲应力最大，且与之垂直。若在接头两端预留一段角焊缝 3 不焊，先焊焊缝 1，再焊腹板对接焊缝 2，焊缝 2 的收缩，使焊缝 1 产生压残余应力。最后焊预留的角焊缝 3，它的收缩使焊缝 1 和焊缝 2 都产生压残余应力。试验表明，这种焊接顺序比先焊焊缝 2 后焊焊缝 1 疲劳强度提高达 30%。

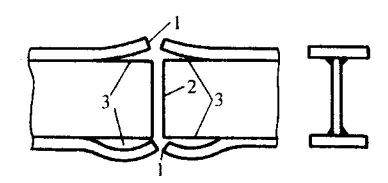


图 6.3-46　工字梁对接接头的焊接顺序

图 6.3-47 为纵向焊缝连接的节点板，在纵缝端部拐角处是应力集中点，采取点状局部加热。若加热温度和位置适当，就能形成一个残余应力场，使该处获得有利的压残余应力。

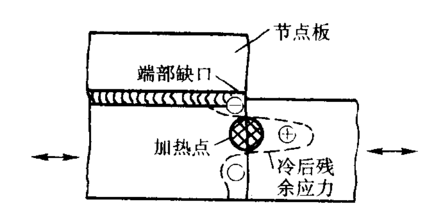


图 6.3-47　节点板局部加热残余应力

3）表面强化处理　可以采取表面形变强化。如滚压、锤击或喷丸等工艺使金属表面塑性变形而硬化，并在表层产生压残余应力，以达到提高焊接接头的疲劳强度。

5.2　焊接接头疲劳强度计算方法

5.2.1　强度条件

疲劳强度许用应力设计法的强度条件为

$$\sigma_{max} \leqslant [\sigma_r]$$

式中，σ_{max} 为设计载荷引起构件的最大应力值；$[\sigma_r]$ 为疲劳许用应力。

疲劳许用应力的确定是设计工作中的重要一环。它是以材料实验的疲劳强度为基础考虑了各种影响因素并除以安全系数后确定的。

不同行业由于承载条件、工作环境和技术要求有各自特点，因而在相应的设计规范中规定了不同的疲劳计算的表达式。

5.2.2　起重机焊接结构的疲劳设计法

对工作级别为 A6 ~ A8 级的结构件按《起重机设计规范》(GB/T 3811—1983) 规定的公式验算疲劳强度，见表 6.3-16。

表中 r 为应力循环特性，其值按下面公式计算（计算时，要带各自的正负号）。

1）单独受正应力或切应力时

表 6.3-16　起重机结构中焊缝疲劳许用应力

应力状态		疲劳许用应力计算公式	备　　注
$r \leqslant 0$	拉 伸	$[\sigma_{rl}] = \frac{1.67[\sigma_{-1}]}{1-0.67r}$	$[\sigma_{-1}]$ —疲劳许用应力的基本值 ($r=-1$)，$[\sigma_{-1}]$的值见表 6.3-17 σ_b—结构件或接头材料的抗拉强度，Q235 钢取 $\sigma_b = 380$ MPa；16 Mn 钢，$\sigma_b = 500$ MPa
	压 缩	$[\sigma_{ra}] = \frac{2[\sigma_{-1}]}{1-r}$	
$r > 0$	拉 伸	$[\sigma_{rl}] = \frac{1.67[\sigma_{-1}]}{1-\left(1-\frac{[\sigma_{-1}]}{0.45\sigma_b}\right)r}$	
	压 缩	$[\sigma_{ra}] = \frac{2[\sigma_{-1}]}{1-\left(1-\frac{[\sigma_{-1}]}{0.45\sigma_b}\right)r}$	
剪切疲劳许用应力		$[\tau_{rt}] = \frac{[\tau_{rt}]}{\sqrt{2}}$	取表 6.3-17 中与 K_0 相应的 $[\sigma_{rl}]$ 的值

拉伸（或压缩）　　$r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

剪切　　$r = \frac{\tau_{min}}{\tau_{max}}$

式中，σ_{min}（τ_{min}）是与 σ_{max}（τ_{max}）在同一载荷组合情况、同一计算位置的计算点的绝对值最小应力，且按不利的情况进行计算。

2）同时承受正应力（σ_x，σ_y）和切应力（τ_{xy}）作用时

$$r_x = \frac{\sigma_{xmin}}{\sigma_{xmax}}$$

$$r_y = \frac{\sigma_{ymin}}{\sigma_{ymax}}$$

$$r_{xy} = \frac{\tau_{xymin}}{\tau_{xymax}}$$

当某种应力在同一载荷组合里显著大于其他两种应力时，可不考虑其他两种应力对疲劳强度的影响，直接按下式验算其疲劳强度。

$$\sigma_{max} \leqslant [\sigma_r]$$

或

$$\tau_{max} \leqslant [\tau_r]$$

式中，$[\sigma_r]$，$[\tau_r]$ 分别表示拉伸或压缩疲劳许用应力和剪切疲劳许用应力。

当接头同时承受正应力和切应力时，应按下式进行研究疲劳强度验算：

$$\left(\frac{\sigma_{xmax}}{[\sigma_{rx}]}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ymax}}{[\sigma_{ry}]}\right)^2 - \frac{\sigma_{xmax}\sigma_{ymax}}{[\sigma_{rx}][\sigma_{ry}]} + \left(\frac{\tau_{xymax}}{[\tau_r]}\right)^2 \leqslant 1.1$$

表 6.3-17 是疲劳许用应力 $[\sigma_{-1}]$ 的基本值，应结合表 6.3-18 中焊接接头应力集中情况等级选取。

表 6.3-17　疲劳许用应力基本值 $[\sigma_{-1}]$　MPa

应力集中情况等级	材料类型	结构工作级别①							
		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
K_0	Q235					168.0	133.3	105.8	84.0
	16Mn					168.0	133.3	105.8	84.0
K_1	Q235				170.0	150.0	119.0	94.5	75.0
	16Mn				188.4	150.0	119.0	94.5	75.0
K_2	Q235			170.0	158.3	126.0	100.0	79.4	63.0
	16Mn			198.4	158.3	126.0	100.0	79.4	63.0
K_3	Q235		170.0	141.7	113.0	90.0	71.4	56.7	45.0
	16Mn		178.5	141.7	113.0	90.0	71.4	56.7	45.0
K_4	Q235	135.9	107.1	85.0	67.9	54.0	42.8	34.0	27.0
	16Mn	135.9	107.1	85.0	67.9	54.0	42.8	34.0	27.0

① 工作级别由起重机利用等级和载荷状态所确定。详见 GB/T 3811—1983。

5.2.3　建筑钢结构的疲劳设计法

建筑钢结构的疲劳设计采用许用应力幅［Δσ］法。该法用应力范围 Δσ 所表示的 $S-N$ 曲线（$\Delta\sigma-N$ 曲线），对构件按其结构类型、受力特点和细节进行分类。常幅疲劳时，按下式验算其疲劳强度：

$$\Delta\sigma \leqslant [\Delta\sigma]$$

式中，Δσ 为计算部位的应力幅，$\Delta\sigma=\sigma_{max}-\sigma_{min}$；［Δσ］为疲劳许用应力幅，MPa。

疲劳许用应力幅［Δσ］是由不同构件和连接进行等幅疲劳试验所得的 $\Delta\sigma-N$ 曲线确定。在双对数坐标图中 $\lg\Delta\sigma-\lg N$ 呈一直线，可得到对应任何应力循环次数 N 的许用应力幅，其表达式为

$$[\Delta\sigma]=\left(\frac{C}{N}\right)^{\frac{1}{\beta}}$$

式中，N 为应力循环次数；C，β 为参数，按表 6.3-20 提供的连接类别，由表 6.3-19 确定。

表 6.3-18　应力集中情况等级（摘自 GB/T 3811—1983）

接头形式	工艺方法说明	应力集中情况等级
	对接焊缝 力方向垂直于焊缝 力方向平行于焊缝	 K_2 K_1
	对接焊缝，焊缝受纵向剪切	K_0
非对称斜度 对称斜度 无斜度	不同厚度的对接焊缝，力方向垂直于焊缝 非对称斜度（1:4）～（1:5） 非对称斜度 1:3 对称斜度 1:3 对称斜度 1:2 非对称、无斜度	 K_1 K_2 K_1 K_2 K_4
	力方向垂直于焊缝，用双面角焊缝把构件焊在主要受力构件上 用连续角焊缝把横隔板、腹板的肋板、圆环或轮毂焊在主要受力构件上（如翼缘或轴）	K_2 K_2
	角焊缝，力方向平行于焊缝	K_1
	梁的盖板和腹板间的 K 形焊缝或角焊缝，梁的腹板横向对接焊缝	K_1 K_1
	十字接头焊缝，力方向垂直于焊缝 K 形焊缝 双面贴角焊缝	 K_3 K_4
	承受弯曲和剪切作用 K 形焊缝 双面帖角焊缝	K_3 K_4
	承受集中载荷的翼缘和腹板间的焊缝 K 形焊缝 双面贴角焊缝	 K_3 K_4
	在整体主要构件侧面焊上与其端面成直角布置的构件，力方向平行于焊缝 焊接件两端有侧角或带圆弧 焊接件两端无侧角	 K_3 K_4
A—A A—A	弯曲的翼缘与腹板间的焊缝 K 形焊缝 双面角焊缝	 K_3 K_4



续表 6.3-18

接头形式	工艺方法说明	应力集中情况等级	接头形式	工艺方法说明	应力集中情况等级
	隔板用双面角焊缝（连续）与翼缘和腹板连接 隔板切角 不切角 用断续焊缝连接	 K_3 K_4 K_4		桁架节点各杆件用角焊缝连接	K_4
	角焊缝	K_3		用管子制成的桁架，其节点用角焊缝连接	K_4

表 6.3-19　不同类别构件和连接的 C 和 β

（摘自 GBJ 50017—2003）

连接类型	1	2	3	4	5	6	7	8
C（$\times 10^{12}$）	1 940	861	3.26	2.18	1.47	0.96	0.65	0.41
β	4	4	3	3	3	3	3	3

表 6.3-20　疲劳计算的构件和连接分类

项次	简　图	说　明	类别
1		无连接处的主体金属 （1）轧制型钢 （2）钢板 1）两侧为轧制边或刨边 2）两侧为自动、半自动切割边（切割质量标准应符合《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205—2001）	 1 1 2
2		横向对接焊缝附近的主体金属 1）焊缝经加工、磨平及无损检验（符合《钢结构工程施工质量验收规范》一级焊缝标准） 2）焊缝经检验，外观尺寸符合一级焊缝标准	 2 3
3	∠1:4　∠1:4	不同厚度（或宽度）横向对接焊缝附近的主体金属，焊缝加工成平滑过渡并符合一级焊缝标准	2
4		纵向对接焊缝附近的主体金属，焊缝符合二级焊缝标准	2

续表 6.3-20

项次	简　图	说　明	类别
5		翼缘连接焊缝附近的主体金属 1）翼缘板与腹板的连接焊缝 a）自动焊，二级T形对接和角接组合焊缝 b）自动焊，角焊缝，外观质量符合二级 c）手工焊，角焊缝，外观质量符合二级 2）双层翼缘板之间的连接焊缝 a）自动焊，角焊缝，外观质量符合二级 b）手工焊，角焊缝，外观质量符合二级	 2 3 4 3 4
6		横向肋板端部附近的主体金属 1）肋端不断弧（采用回焊） 2）肋端断弧	 4 5
7	r≥60mm　r≥60mm	梯形节点板对焊于梁翼缘、腹板以及桁架构件处的主体金属，过渡处在焊后铲平、磨光、圆滑过渡，不得有焊接起弧、灭弧缺陷	5
8		矩形节点板焊接于构件翼缘或腹板处的主体金属，$l > 150$ mm	7

续表 6.3-20

项次	简　图	说　明	类别
9		翼缘板中断处的主体金属（板端有正面焊缝）	7
10		向正面角焊缝过渡处的主体金属	6
11		两侧面角焊缝连接端部的主体金属	8
12		三面围焊的角焊缝端部主体金属	7
13		三面围焊或两侧面角焊缝连接的节点板主体金属（节点板计算宽度按扩散角 θ 等于30°考虑）	7
14		K 形坡口 T 形对接与角接组合焊缝处的主体金属，两板轴线偏离小于 0.15δ，焊缝经无损检验且焊趾角 $\alpha \leqslant 45°$	5

续表 6.3-20

项次	简　图	说　明	类别
15		十字接头角焊缝处的主体金属，两板轴线偏离小于 0.15δ	7
16	角焊缝	按有效截面确定的应力幅计算	8

对应力循环内的应力幅随机变化的变幅疲劳，若能预测结构在使用寿命期间各种载荷的频率分布，应力幅水平以及频次分布总和所构成的设计应力谱，则可将其折算为等效常幅疲劳，按下式计算：

$$\Delta\sigma_e = \left[\frac{\sum n_i\ (\Delta\sigma_i)^\beta}{\sum n_i}\right]^{\frac{1}{\beta}} \leqslant [\Delta\sigma]$$

式中，$\Delta\sigma_e$ 为变幅疲劳的等效应力幅；$\sum n_i$ 为以应力循环次数表示的结构预期使用寿命；n_i 为预期使用寿命内应力幅达到 $\Delta\sigma_i$ 的应力循环次数。

以上疲劳强度的计算均是“无缺陷”材料的高周疲劳作为研究对象，因此不适于高应力、低应力循环次数，由反复性塑性应变产生破坏的低周疲劳问题。且这类方法由于未考虑焊接结构中的缺陷、形状间断性应力集中、残余应力、制造几何缺陷、焊接接头的非均质性及实际加载频率等，因而疲劳强度计算与实际结构有一定的出入。

5.2.4　应力折减系数的疲劳设计法

对于没有设计规范规定的普通机件的焊接接头疲劳强度计算，可采用应力折减系数的疲劳设计法。其疲劳许用应力 $[\sigma_r]$ 是以静载时所选用的焊缝的许用应力 $[\sigma']$ 值乘上折减系数 β 确定的，即

$$[\sigma_r] = \beta[\sigma']$$

$$\beta = \frac{1}{(aK_\sigma + b) - (aK_\sigma - b)r}$$

式中，a，b 为材料系数，按表 6.3-21 选取；K_σ 为有效应力集中系数，按表 6.3-22 选取；r 为应力循环特性。

疲劳强度按下式计算：

$$\sigma_{max} \leqslant [\sigma_r]$$

表 6.3-21　材料系数 a 和 b 的值

结构形式	钢　种	系数 a	系数 b
脉动循环载荷作用下的结构	碳素结构钢	0.75	0.3
	低合金结构钢	0.8	0.3
对称循环载荷作用下的结构	碳素结构钢	0.9	0.3
	低合金结构钢	0.95	0.3

表 6.3-22　焊接结构的有效应力集中系数 K_σ

焊接形式	K_σ 碳素结构钢	K_σ 低合金结构钢	图　示（“a-a”表示焊接接头的计算截面）
对接焊缝，焊缝全部焊透	1.0	1.0	a a a a
对接焊缝，焊缝根部未焊透	2.67	—	a a a a 未焊透



续表 6.3-22

焊接型式	K_σ		图示（"a－a"表示焊接接头的计算截面）
	碳素结构钢	低合金结构钢	
搭接的端焊缝 1）焊条电弧焊 2）埋弧焊	 2.3 1.7	 — —	
侧缝焊，焊条电弧焊	3.4	4.4	
邻近焊缝的母体金属，对接焊缝的热影响区 1）经机械加工	 1.1	 1.2	
2）由焊缝至母体金属的过渡区足够平滑时，未经机械加工 直焊缝时 斜焊缝时	 1.4 1.3	 1.5 1.4	
3）由焊缝至母体金属的过渡区足够平滑时，但焊缝高出母体金属 0.2δ，未经机械加工的直焊缝	1.8	2.2	
4）由焊缝至母体金属的过渡区足够平滑时，有垫圈的管子对接焊缝，未经机械加工	1.5	2.0	管子
5）沿力作用线的对接焊缝，未经机械加工	1.1	1.2	
邻近焊缝的母体金属，搭接焊缝中端焊缝的热影响区 1）焊趾长度比为2～2.5的端焊缝，未经机械加工	 2.4	 2.8	
2）焊趾长度比为2～25的端焊缝，经机械加工	1.8	2.1	
3）焊趾等长度的凸形端焊缝，未经机械加工	3.0	3.5	
4）焊趾长度比为2～2.5的端焊缝，未经机械加工，但经母体金属传递力	1.7	2.3	
5）焊趾长度比为2～2.5的端焊缝，由焊缝至母体金属的过渡区经机械加工，经母体金属传递力	1.4	1.9	
6）焊趾等长度的凸形端焊缝，未经机械加工，但经母体金属传递力	2.2	2.6	
7）在母体金属上加焊直焊缝	2.0	2.3	
搭接焊缝中的侧焊缝 1）经焊缝传递力，并与截面对称	 3.2	 3.5	
2）经焊缝传递力，与截面不对称	3.5	—	
3）经母体金属传递力	3.0	3.8	
4）在母体金属上加焊纵向焊缝	2.2	2.5	



续表 6.3-22

焊接形式	K_σ		图示（"a-a"表示焊接接头的计算截面）
	碳素结构钢	低合金结构钢	
母体金属上加焊板件 1）加焊矩形板，周边焊接，应力集中区未经机械加工 2）加焊矩形板，周边焊接，应力集中区经机械加工 3）加焊梯形板，周边焊接，应力集中区经机械加工	 2.5 2.0 1.5	 3.5 — 2.0	
组合焊缝	3.0	—	

6　焊缝符号及其在图样上的标注

在焊接结构图样上对焊缝的形状尺寸和工艺要求，既可以用技术制图方法表示，也可用焊缝符号来表示。对大型而复杂的焊接结构当采用缩小比例来绘制图样时，在焊接接头处的焊缝采用代表它的符号来说明其形状尺寸和工艺要求，就可以达到简化图样的目的。焊缝符号在这里起着传递焊接有关信息的作用。

焊缝符号现已成为设计者与制造者之间及工程科技人员之间相互沟通与交流的一种技术语言。各国均以标准化的方式将焊缝符号的使用和表达规则予以确定，形成各自的焊缝符号标准。我国1964年颁布了焊缝符号的国家标准GB 324—1964，统一了焊缝符号在国内工程技术上的应用。随着国际技术交流日益频繁，焊缝符号标准也趋于全球统一。从1980年起我国先后两次参照了当时的国际标准ISO 2553进行修订，形成了现行的国家标准《焊缝符号表示法》（GB/T 324—1988）。与之配套，还先后颁布了《金属焊接及钎焊方法在图样上的表示代号》（GB/T 5185—1985）和《技术制图焊缝符号的尺寸、比例及简化表示法》（GB/T 12212—1990）等标准。本节摘要介绍这几个标准的主要内容。

《焊缝符号表示法》（GB/T 324—1988）等效采用国际标准ISO 2553—84《焊缝在图样上的符号表示方法》。它对用于金属熔化焊及电阻焊结构上的焊缝符号及其在图样上的标注规则作了明确规定。一般由基本符号与指引线组成，必要时还可以加上辅助符号、补充符号和焊缝尺寸符号等。图形符号的比例、尺寸和在图样上的标注方法，则按GB/T 12212—1990的规定进行。

6.1　焊缝符号

焊缝符号包括基本符号、辅助符号、补充符号、尺寸符号和特殊焊缝符号等。

（1）焊缝的基本符号

焊缝的基本符号是表示焊缝截面形状的符号，见表6.3-23。

表 6.3-23　焊缝的基本符号

序号	名称	示意	符号	序号	名称	示意	符号
1	卷边焊缝（卷边完全熔化）		⼋	8	带钝边J形焊缝		Ƴ
2	I形焊缝		‖	9	封底焊缝		◡
3	V形焊缝		V	10	角焊缝		◺
4	单边V形焊缝		V	11	塞焊缝或槽焊缝		⊓
5	Y形焊缝		Y	12	点焊缝		○
6	单边Y形焊缝		Y	13	缝焊缝		⊖
7	带钝边U形焊缝		Y				

（2）焊缝的辅助符号

焊缝的辅助符号是表示焊缝表面形状特征的符号，见表6.3-24。当不需确切说明焊缝表面形状时，可以不用辅助符号。

表 6.3-24 焊缝的辅助符号

序号	名称	示意	符号	说明
1	平面符号		—	焊缝表面齐平（一般通过加工）
2	凹面符号		◡	焊缝表面凹陷
3	凸面符号		⌒	焊缝表面凸起

（3）焊缝的补充符号

焊缝的补充符号是为了补充说明焊缝的某些特征而采用的符号，见表6.3-25。

表 6.3-25 焊缝的补充符号

序号	名称	示意	符号	说明
1	带垫板符号		▭	表示焊缝底部有垫板
2	三面焊缝符号		⊏	表示三面带有焊缝
3	周围焊缝符号		○	表示环绕工件周围焊缝
4	现场符号		⚑	表示在现场或工地上进行焊接的焊缝
5	尾部符号		<	在它的右侧可标注焊接工艺方法等内容

（4）焊缝的尺寸符号

焊缝基本符号在必要时可以附带尺寸符号及数据，这些尺寸符号见表6.3-26。

表 6.3-26 焊缝的尺寸符号

符号	名称	示意	符号	名称	示意
δ	工件厚度		c	焊缝宽度	
α	坡口角度		R	根部半径	

续表 6.3-26

符号	名称	示意	符号	名称	示意
l	焊缝长度		d	熔核直径	
n	焊缝段数	$n=2$	S	焊缝有效厚度	
e	焊缝间距		N	相同焊缝数量符号	$N=3$
K	焊脚尺寸		H	坡口深度	
b	根部间隙		h	余高	
p	钝边		β	坡口面角度	

（5）特殊焊缝符号

特殊焊缝是指喇叭焊缝、堆焊焊缝和锁边焊缝等的符号。见表6.3-27。

表 6.3-27 特殊焊缝符号

序号	名称	示意	符号
1	喇叭形焊缝		ϒ(
2	单边喇叭形焊缝		|(
3	堆焊缝		⌒⌒
4	锁边焊缝		↳

6.2 焊接方法在图样上的表示代号

在图样上需指明焊缝的焊接方法时，可以在该焊缝的指引线尾部用表示该焊接方法的代号来标注。GB/T 5185—1985规定了金属焊接及钎焊方法在图样上的表示代号，见表6.3-28。

6.3 焊缝符号在图样上的标注方法

在焊接结构的图样上，焊缝的位置是用指引线去标示，该焊缝的形状尺寸和工艺要求等技术信息则是通过焊缝符号标注在指引线的特定位置上来表达。因此，首先须明确规定焊缝指引线的构成，各组成部分的画法及其相对于接头的位置，然后再规定各种焊缝符号的标注法则。



表 6.3-28　金属焊接及钎焊方法在图样上的表示代号

代　号	焊　接　方　法	代　号	焊　接　方　法
1	电弧焊	42	摩擦焊
11	无气体保护电弧焊	43	锻　焊
111	焊条电弧焊（涂料焊条熔化极电弧焊）	44	高机械能焊
112	重力焊（涂料焊条重力电弧焊）	441	爆炸焊
113	光焊丝电弧焊	45	扩散焊
114	药芯焊丝电弧焊	47	气压焊
115	涂层焊丝电弧焊	48	冷压焊
116	熔化极电弧点焊	7	其他焊接方法
118	躺焊	71	铝热焊
12	埋弧焊	72	电渣焊
121	丝极埋弧焊	73	气电立焊
122	带极埋弧焊	74	感应焊
13	熔化极气体保护电弧焊	75	光束焊
131	MIG 焊：熔化极惰性气体保护焊（含熔化极 Ar 弧焊）	751	激光焊
		752	弧光光束焊
135	MAG 焊：熔化极非惰性气体保护焊（含 CO_2 保护焊）	753	红外线焊
		76	电子束焊
136	非惰性气体保护药芯焊丝电弧焊	77	储能焊
137	非惰性气体保护熔化极电弧点焊	78	螺柱焊
14	非熔化极气体保护电弧焊	781	螺柱电弧焊
141	TIG 焊：钨极惰性气体保护焊（含钨极 Ar 弧焊）	782	螺柱电阻焊
		9	硬钎焊、软钎焊、钎接焊
142	TIG 焊	91	硬钎焊
149	原子氢焊	911	红外线硬钎焊
15	等离子弧焊	912	火焰硬钎焊
151	大电流等离子弧焊	913	炉中硬钎焊
152	微束等离子弧焊	914	浸沾硬钎焊
153	等离子弧粉末堆焊（喷焊）	915	盐浴硬钎焊
154	等离子弧填丝堆焊（冷、热丝）	916	感应硬钎焊
155	等离子弧 MIG 焊	917	超声波硬钎焊
156	等离子弧点焊		
18	其他电弧焊方法	918	电阻硬钎焊
181	碳弧焊	919	扩散硬钎焊
185	旋弧焊	923	摩擦硬钎焊
2	电阻焊	924	真空硬钎焊
21	点　焊	93	其他硬钎焊方法
22	缝　焊	94	软钎焊
221	搭接缝焊	941	红外线软钎焊
223	加带缝焊	942	火焰软钎焊
23	凸　焊	943	炉中软钎焊
24	闪光焊	944	浸沾软钎焊
25	电阻对焊	945	盐浴软钎焊
29	其他电阻焊方法	946	感应软钎焊
291	高频电阻焊	947	超声波软钎焊
3	气　焊	948	电阻软钎焊
31	氧－燃气焊	949	扩散软钎焊
311	氧－乙炔焊	951	波峰浇注软钎焊
312	氧－丙烷焊	952	烙铁软钎焊
313	氢－氧焊	953	摩擦软钎焊
32	空气－燃气焊	954	真空软钎焊
321	空气－乙炔焊	96	其他软钎焊方法
322	空气－丙烷焊	97	钎接焊
33	氧－乙炔喷焊（堆焊）	971	气体钎接焊
4	压　焊	972	电弧钎接焊
41	超声波焊		



(1) 指引线及基本符号的标注位置

指引线一般由带有箭头的指引线（简称箭头线）和两条基准线（一条为实线，另一条为虚线）两部分组成，见图6.3-48。

1）箭头线　箭头线与接头之间有焊缝在箭头侧和焊缝在非箭头侧的两种关系，以带单角焊缝的T形接头为例，如图6.3-49所示。

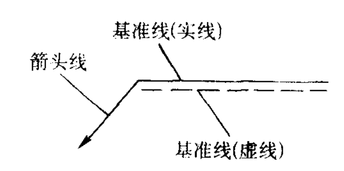


图6.3-48　指引线的组成

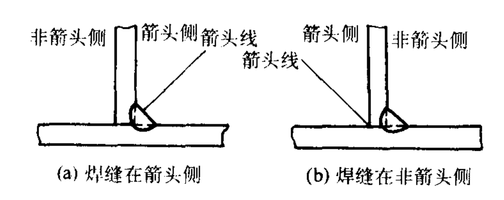


图6.3-49　焊接接头的箭头侧和非箭头侧

箭头线相对于焊缝的位置一般没有特殊要求，但是在标注只单边有坡口的焊缝时，箭头线应指向带有坡口一侧的焊件，如图6.3-50所示。必要时，允许箭头线弯折一次。

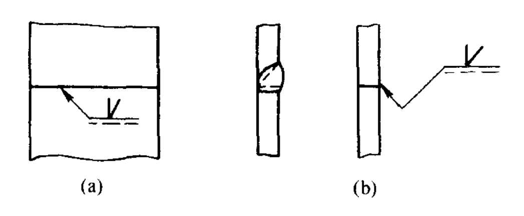


图6.3-50　箭头线的标注位置和画法

2）基准线　两条基准线中虚线可画在实线的下侧或上侧。当标注对称焊缝或双面焊缝时，可不加虚线。基准线一般应与图样的底边相平行，但特殊条件下亦可与底边相垂直。

3）基本符号相对于基准线的位置　如果焊缝在接头的箭头侧，则基本符号标在基准线的实线侧；如果焊缝在接头的非箭头侧，则基本符号标在基准线的虚线侧。如表6.3-29所示。

表6.3-29　基本符号相对于基准线的位置

焊缝位置	标注方法
焊缝在接头的箭头侧	或
焊缝在接头的非箭头侧	或
对称焊缝（或双面焊缝）	（或 ）

(2) 焊缝尺寸符号及其标注位置

基本符号必要时可附带有尺寸符号及数据，其标注原则（图6.3-51）如下。

① 焊缝横截面上的尺寸标在基本符号的左侧。

② 焊缝长度方向的尺寸标在基本符号的右侧。

③ 坡口角度、坡口面角度、根部间隙等尺寸标在基本符号的上侧或下侧。

④ 相同焊缝数量符号标在尾部的右侧。

⑤ 当需要标注的尺寸数据较多又不易分辨时，可在数据前增加相应的尺寸符号。

⑥ 在基本符号的右侧无任何标注且又无其他说明时，表示焊缝在工件的整个长度上是连续的。

⑦ 在基本符号的左侧无任何标注且又无其他说明时，表示对接焊缝要完全焊透。

⑧ 塞焊缝，槽焊缝带有斜边时，应标注孔底部的尺寸。当箭头线方向变化时，上述原则不变。

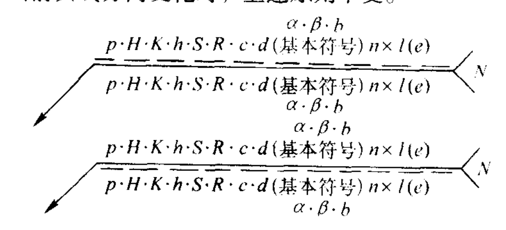
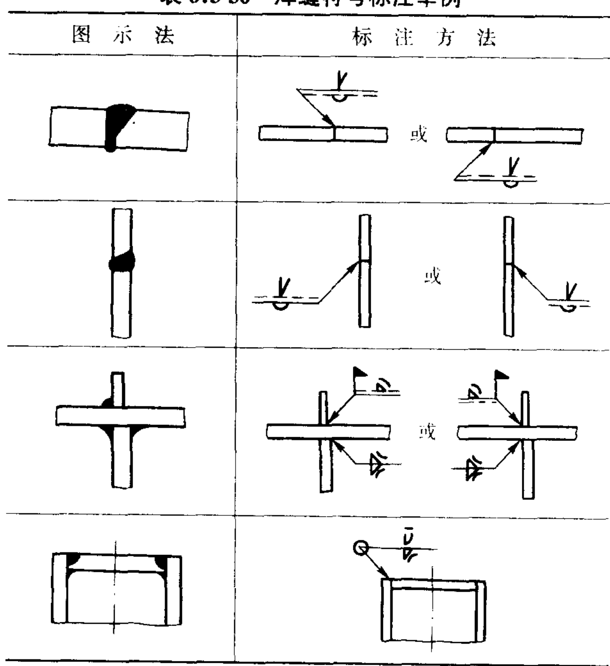


图6.3-51　焊缝尺寸的标注原则

(3) 标注举例

1）焊缝符号标注举例（表6.3-30）

表6.3-30　焊缝符号标注举例



图示法	标注方法
	或
	或
	或

2）焊接方法代号标注举例（表6.3-31）

表6.3-31　焊接方法代号应用举例

标注例	含义
111	表示两面对称角焊缝，采用焊条电弧焊
12/15	表示V形焊缝，先用等离子弧焊打底，后用埋弧焊盖面

6.4　各国焊缝基本符号对照

表6.3-32列出几个工业国家标准中焊缝基本符号的对照。



表 6.3-32　各国焊缝基本符号对照表

焊缝名称	焊缝形式	中　国 GB/T 324—1988	ISO 2553—1984	美　国 AWSA2068	原苏联 ГОСТ 5263—58	日　本 JISZ 3020—1981	德　国 DIN 1912—1979	英　国 BS 499 pt2.1980
V 形								
双 Y 形								
单边 V 形								
双单边 Y 形								
U 形								
J 形带钝边								
双 U 形带钝边								
双 J 形带钝边								
I 形								
I 形两面焊								
喇叭形								
单边喇叭形								
角焊								
塞焊或槽焊				ox—d—t				
堆焊								
电阻对焊				I				
点焊				ox—d—t				
缝焊				ob				

6.5 焊缝符号的尺寸、比例及简化表示法

《技术制图 焊缝符号的尺寸、比例及简化表示法》(GB/T 12212—1990) 标准对焊缝符号的尺寸、比例及简化表示法作了如下规定。

在技术图样中，焊缝一般应按 GB/T 324—1988 规定的焊缝符号表示，也可按国标规定的有关制图方法（如 GB4458.1 和 GB4458.3 等）表示。

(1) 图示法

需要在图样中简易地绘制焊缝时，可以用视图、剖视图或剖面图表示，也可以用轴测图示意表示。

1) 在视图中表示焊缝的方法　当在俯视图上表示焊缝时，可按表 6.3-33 所示。当在侧视图上表示焊缝时，应用粗线绘出焊缝轮廓，用细实线画出焊前的坡口形状，见图 6.3-52。

表 6.3-33 在俯视图上表示焊缝

表示方法	连续焊缝	断续焊缝	交错断续焊缝
用细实线表示			
用粗线（2b～3b）表示			

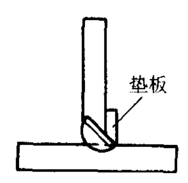
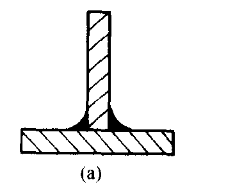


图 6.3-52 在侧视图上表示焊缝

2) 在剖视图或剖面图上表示焊缝　焊缝金属通常应涂黑，如图 6.3-53a 所示。如果同时要表示坡口形状时，如图 6.3-53b 所示，坡口形状用细实线画出；局部放大图的画法，如图 6.3-54 所示。若在图样中采用图示法绘出焊缝时，应同时标注焊缝符号，见图 6.3-55。



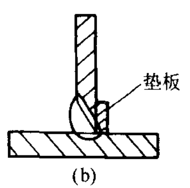
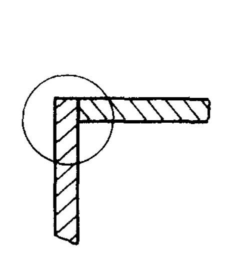


图 6.3-53 在剖示图或剖面图上表示焊缝



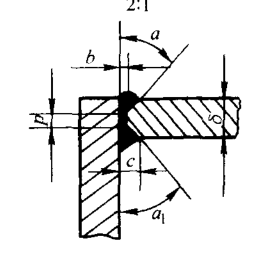
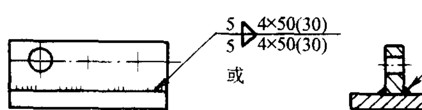


图 6.3-54 焊缝的局部放大图画法



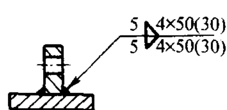


图 6.3-55 用图示法绘出焊缝的焊缝符号标注

(2) 焊缝符号的尺寸和比例

1) 基本规定

① 焊缝图形符号及其组成，应按 GB 7093.2 的有关规则设计和绘制。

② 焊缝符号的字体和图线应符合 GB4457.3 和 GB4457.4 的规定。

③ 焊缝指引线中，基准线的细实线和虚线，分别用 GB4457.4 中的 B 形线和 F 形线；箭头线的细实线用 GB4457.4 中的 B 形线。

2) 尺寸与比例

① 焊缝图形符号在双基准线上的位置及比例关系，按图 6.3-56 所示。

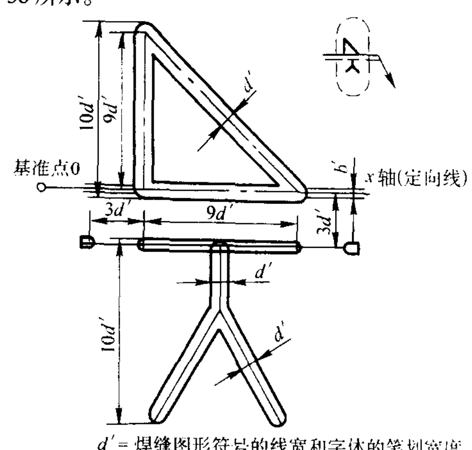


图 6.3-56 焊缝图形符号在双基准线上的位置及比例关系

② 对称焊缝图形在基准线上的位置及比例关系，示于图 6.3-57。

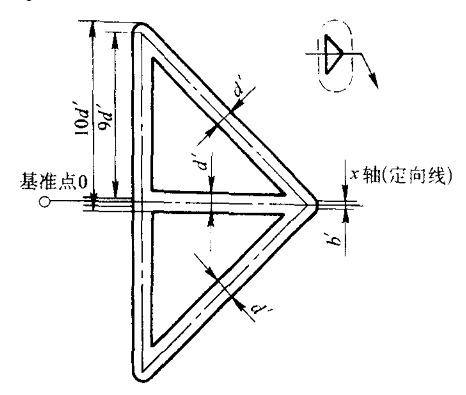


图 6.3-57 对称焊缝图形在基准线上的位置及比例关系



③ 焊缝符号的尺寸系列，见表6.3-34。

表6.3-34　焊缝符号的尺寸系列　mm

轮廓线宽度 b	0.5	0.7	1	1.4	2
数字和大写字母的高度 h	3.5	5	7	10	14
焊缝图形符号的线宽[①]和字体的笔划宽度 $d'=(1/10)h$	0.35	0.5	0.7	1	1.4

① 当焊缝图形符号与基准线（细实线或细虚线）的线宽比较接近时，允许将焊缝图形符号加粗表示。

④ 基本符号的尺寸和比例，见表6.3-35。

⑤ 辅助符号的尺寸和比例，按表6.3-36。

⑥ 补充符号的尺寸和比例，按表6.3-37。

⑦ 特殊情况下使用的焊缝符号的尺寸和比例，见表6.3-38。

⑧ 常用几种基本符号组合的尺寸和比例，见表6.3-39。

⑨ 基本符号与辅助符号、补充符号及焊缝尺寸符号组合的尺寸和比例，见表6.3-40。

表6.3-35　焊缝基本符号的尺寸和比例

序号	符　　号	名　称	说　明
1	3d′, R8.5d′, 10d′	卷边焊缝	R8.5d′为指向图线中心的尺寸
2	7d′, 10d′	I形焊缝	
3	10d′, 60°	V形焊缝	
4	10d′, 45°	单边V形焊缝	
5	10d′, 4d′	Y形焊缝	其他尺寸参照序号3
6	10d′, 4d′	单边Y形焊缝	其他尺寸参照序号4
7	R4.5d′, 10d′, 3d′	带钝边U形焊缝	R4.5d′为指向图线中心的尺寸
8		带钝边J形焊缝	尺寸参照序号7
9	R8d′, 5d′	封底焊缝	R8d′为指向图线中心的尺寸
10	10d′, 45°	角焊缝	
11	12d′, 7d′	塞焊缝或槽焊缝	
12	ϕ13d′	点焊缝	ϕ13d′为指向图线中心的尺寸
			偏离中心；尺寸参照上图
13	20d′, 5d′	缝焊缝	其他尺寸参照序号12
			偏离中心；尺寸参照上图

表6.3-36　辅助符号的尺寸和比例

序号	符　　号	名　称	说　明
1	15d′	平形符号	表示焊缝表面平整（一般通过加工）
	45°, 15d′		
	15d′, 45°		
2	R7.5d′	凹形符号	表示焊缝表面凹陷，R7.5d′为指向图线中心的尺寸
2	R7.5d′	凹形符号	表示焊缝表面凹陷，R7.5d′为指向图线中心的尺寸
3		凸形符号	表示焊缝表面凸起，尺寸参照序号2

表 6.3-37 补充符号的尺寸和比例

序号	符号	名称	说明	序号	符号	名称	说明
1	12d' 5d'	带垫板符号	表示焊缝底部有垫板	4	15d' 10d'	现场符号	表示在现场或工地施焊
2	12d' 10d'	三面焊缝符号	表示三面带有焊缝，标注时要求该符号的方向与三面焊缝方向相一致	5	10d' 90°	尾部符号	在该符号后面可参照 GB 5185—85 标注焊接工艺方法以及焊缝条数等内容
3	$\phi10d'$	周围焊缝符号	表示环绕工件周围施焊；$\phi10d'$ 为指向图线中心的尺寸	6	25d' 10d'	交错断续焊接符号	表示焊缝由一组交错断续的相同焊缝组成

表 6.3-38 特殊情况下用的焊缝符号的尺寸和比例

序号	符号	名称	说明	序号	符号	名称	说明
1	$R8.5d'$ 10d' 3d'	喇叭形焊缝	$R8.5d'$ 为指向图线中心的尺寸	3	7d' $R6.5d'$	堆焊焊缝	$R6.5d'$ 为指向图线中心的尺寸
2		单边喇叭形焊缝	尺寸参照序号 1	4	10d' 45° 8d' 10d' 5d'	锁边焊缝	

表 6.3-39 几种基本符号组合的尺寸和比例

序号	名称	符号	序号	名称	符号
1	双面 I 形焊缝		5	双面单边 Y 形焊缝	
2	双面 V 形焊缝		6	带钝边双 U 形焊缝	
3	双面单边 V 形焊缝		7	带钝边双 J 形焊缝	
4	双面 Y 形焊缝		8	对称角焊缝	



表 6.3-40　焊缝各种符号组合的尺寸和比例

序　号	符号组合	示　　例	说　　明
1			表示V形焊缝在箭头侧，带钝边U形焊缝在非箭头侧
2			表示双面I形焊缝（凸形）
3			表示现场施焊：塞焊缝或槽焊缝在箭头侧，箭头线也可由基准线的左端引出，当标注位置受到限制时，允许弯折一次
4		111/12	表示周围施焊，由埋弧焊形成的V形焊缝（平整）在箭头侧，由焊条电弧焊形成的封底焊缝（平整）在非箭头侧
5		4条	表示相同角焊缝数量 $N=4$，在箭头侧
6		5 210	表示角焊缝（凹形）在箭头侧，焊脚尺寸为5 mm，焊缝长度为210 mm，工件三面带有焊缝
7		5 210	表示I形焊缝在非箭头侧，焊缝有效厚度为5 mm，焊缝长度为210 mm
8		5 35×50 (30) 5 35×50 (30)	表示交错断续角焊缝焊脚尺寸为5 mm，相邻焊缝的间距为30 mm，焊缝段数为35，每段焊缝长度为50 mm

(3) 焊缝符号的简化标注方法

1) 可简化标注的内容

① 当同一图样上全部焊缝所采用的焊接方法完全相同时，焊缝符号尾部表示焊接方法的代号可省略不注，但必须在技术要求或其他技术文件中注明"全部焊缝均采用×××焊"等字样；当大部分焊接方法相同时，也可在技术要求或其他技术文件中注明"除图样中注明的焊接方法外，其余焊缝均采用×××焊"等字样。

② 在焊缝符号中标注对称焊缝和交错对称焊缝的尺寸时，允许在基准线上只标注一次。

③ 当断续焊缝、对称断续焊缝和交错断续焊缝的段数无严格要求时，允许省略焊缝段数。

④ 在同一图样中，当若干条焊缝的坡口尺寸和焊缝符号均相同时，可集中标注，如图6.3-58a所示；当这些焊缝在各接头中的位置均相同时，也可采用在焊缝符号的尾部加注相同焊缝数量的方法简化标注，如图6.3-58b所示。

⑤ 当同一图样中全部焊缝相同且已用图示法明确表示其位置时，可统一在技术要求中用符号表示或用文字说明，如"全部焊缝为5◺"；当部分焊缝相同时，也可采用同样方法表示，但剩余焊缝应在图样中明确标注。

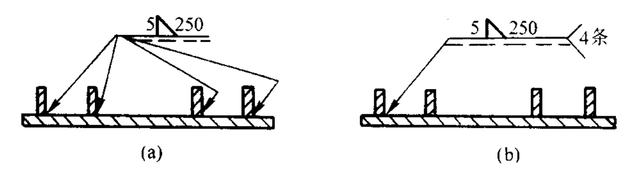


图 6.3-58　数条相同焊缝集中标注法

⑥ 如标注位置受限制时，可以用简化代号标注焊缝，但必须在该图样下方或在标题栏附近说明这些简化代号的意义，如图6.3-59所示。

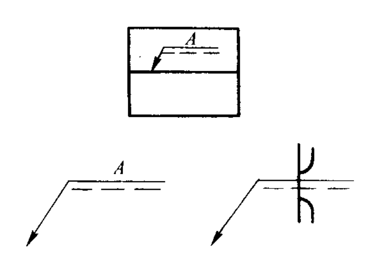


图 6.3-59　用简化代号标注焊缝法

⑦ 在不致引起误解的情况下，当箭头线指向焊缝，而非箭头侧又无焊缝要求时，允许省略非箭头侧的基准线（虚线），如图6.3-60所示。

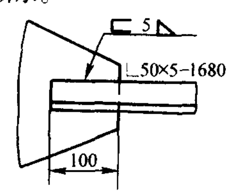


图6.3-60 省略非箭头侧的基准线（虚线）例子

⑧ 当焊缝长度的起始和终止位置明确（已由构件的尺寸等确定）时，允许在焊缝符号中省略焊缝长度，如图6.3-59所示。

⑨ 现场符号允许如图6.3-61所示简化。

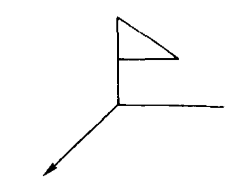


图6.3-61 现场符号的简化标注法

2）简化标注法示例，见表6.3-41。

表6.3-41 简化标注法示例

序号	视图或剖视图画法示例	焊缝符号及定位尺寸简化标注法示例	说明
1			断续I形焊缝在箭头侧，其中 L 是确定焊缝起始位置的定位尺寸
			省略了焊缝段数和非箭头侧的基准线（虚线）
2			对称断续角焊缝，构件两端均有焊缝
			省略了焊缝段数；焊缝尺寸只在基准线上标注了一次
3			交错断续角焊缝；其中 L 是确定箭头侧焊缝起始位置的定位尺寸，工件在非箭头侧两端均有焊缝
			说明见序号2



续表 6.3-41

序号	视图或剖视图画法示例	焊缝符号及定位尺寸简化标注法示例	说　明
4			交错断续角焊缝；其中 L_1 是确定箭头侧焊缝起始位置的定位尺寸；L_2 是确定非箭头侧焊缝起始位置的定位尺寸
			说明见序号 2
5			塞焊缝在箭头侧；其中 L 定确定焊缝起始孔中心位置的定位尺寸
			说明见序号 1
6			槽焊缝在箭头侧，其中 L 是确定焊缝起始槽对称中心位置的定位尺寸
			说明见序号 1
7			点焊缝位于中心位置，其中 L 是确定焊缝起始焊点中心位置的定位尺寸
			省略了焊缝段数
8			点焊缝偏离中心位置，在箭头侧
			说明见序号 1



续表 6.3-41

序号	视图或剖视图画法示例	焊缝符号及定位尺寸简化标注法示例	说　明
9			两行对称点焊缝位于中心位置；其中 e_1 是相邻两焊点中心的间距；e_2 是点焊缝的行间距；L 是确定第一列焊缝起始焊点中心位置的定位尺寸
			说明见序号 7
10			交错点焊缝位于中心位置；其中 L_1 是确定第一行焊缝起始焊点中心位置的定位尺寸，L_2 是确定第二行焊缝起始焊点中心位置的定位尺寸
			说明见序号 2
11			缝焊缝位于中心位置；其中 e 是确定起始缝对中心位置的定位尺寸
			说明见序号 7
12			缝焊缝偏离中心位置，在箭头侧；说明见序号 11
			说明见序号 1

注：1. 图中 L、L_1、L_2、l、e、e_1、e_2、s、d、c、n 等是尺寸代号，在图样中应标出具体数值。
2. 在焊缝符号标注中省略焊缝段数和非箭头侧的基准线（虚线）时，必须认真分析，不得产生误解。

6.6　焊缝无损检测符号及其在图样上的标注

在焊接结构的图样上，对焊缝的形状尺寸和工艺要求可以用焊缝符号来表示。对焊缝焊完以后，要不要无损检测、用什么方法来检测以及检测的范围等技术要求，同样可以用符号加以说明。国家标准《焊缝无损检测符号》（GB/T 14693—1993）对此已作了统一规定。因在图样上无损检测符号和焊缝符号可组合使用，故需了解这些符号的含义及其使用规则。

（1）无损检测符号的要素及其标准位置

1）无损检测符号的要素　无损检测符号的要素有：基准线，箭头，检测方法代号，检测尺寸、面积和抽查数目，辅助符号，基准线尾部，技术说明、检测规范或其他参考标准等。其中由箭头、基准线和基准线尾部组成的指引线与焊缝符号用的指引线完全相同，用法也相似。箭头需指向检测部位，亦分箭头侧和非箭头侧；基准线也分实线和虚线，虚线可画在实线的上侧或下侧；当需要技术说明或指示参考标准等时，才使用基准线尾部。

2）检测方法的代号和辅助符号，见表 6.3-42。

表 6.3-42　焊缝无损检测方法代号和辅助符号（摘自 GB/T 14693—1993）

	代　号	名　称	代　号	名　称	代　号	名　称
检测方法	NDT	无损检测	MT	磁粉探伤	RT	射线探伤
	AET	声发射检测	NRT	中子射线探伤	TM	测厚
	ET	涡流探伤	PRT	耐压试验	UT	超声（波）探伤
	LT	泄漏探伤	PT	渗透探伤	VT	目测检查
辅助符号	全周检测		现场检测		射线方向	

3）各要素的标准位置　各要素的标准位置如图 6.3-62 所示。

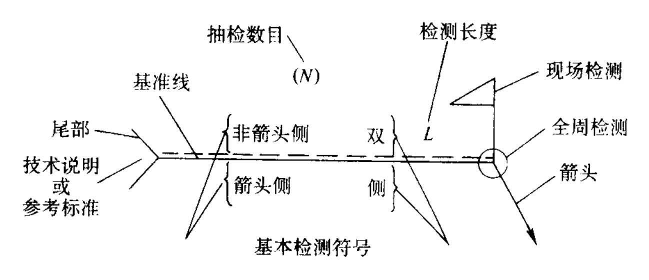


图 6.3-62　无损检测符号要素的标准位置

（2）标注方法

1）检测部分的箭头侧与非箭头侧　箭头是由基准线指向检测部分。箭头指向检测部分的一侧称为检测部分的箭头侧，反之为检测部分的非箭头侧。

2）检测方法代号的标注位置及其含义

① 当检测方法代号置于基准线实线侧时，表示箭头侧将要进行这种检测。如图 6.3-63 所示。

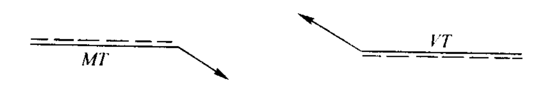


图 6.3-63　箭头侧的检测

② 当检测方法代号置于基准线虚线侧时，表示非箭头侧将要进行这种检测。如图 6.3-64。



图 6.3-64　非箭头侧的检测

③ 当检测方法代号置于基准线两侧时，表示箭头侧和非箭头侧均需进行这种检测，这时可不用虚线，如图 6.3-65 所示。

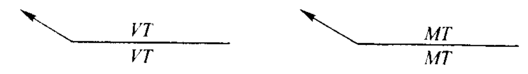


图 6.3-65　箭头侧和非箭头侧的检测

④ 当检测方法代号置于基准线中间时，表示箭头侧或非箭头侧中任选一侧进行检测方法代号规定的检测，此时可不加虚线，如图 6.3-66 所示。

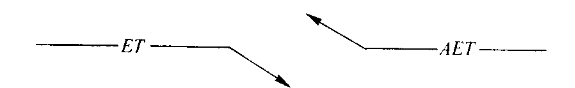


图 6.3-66　箭头侧或非箭头侧的检测

⑤ 对同一部分使用两种或两种以上检测方法时，把它们的代号放在基准线正确位置上，当置于基准线同侧或基准线中间时，应用“+”分开。如图 6.3-67 所示。

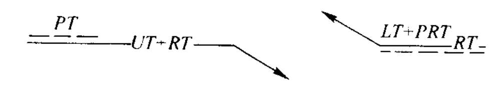


图 6.3-67　多种检测的标注法

⑥ 对同一条焊缝需说明其焊接要求和无损检测要求时，可以将无损检测符号和焊缝符号组合在一起使用。这时共用一条箭头线，基准线则平行地分开，按各自的规则标注符号，如图 6.3-68 所示。图 6.3-68a 表示对于具有封底焊缝的接头，箭头侧和非箭头侧均应进行磁粉探伤；图 6.3-68b 表示对于 X 形坡口的对接焊缝可在箭头侧或非箭头侧中任一侧进行超声波现场探伤。

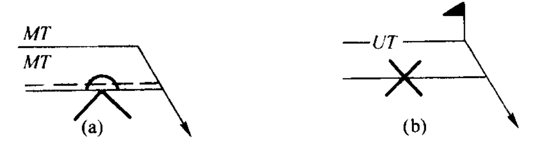


图6.3-68　无损检测符号和焊缝符号组合使用

3）辅助符号的使用与标注

① 需对焊缝或零件作全周检测时，把全周检测符号置于箭头和基准线的连接处，如图6.3-69所示。

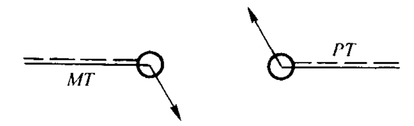


图6.3-69　全周检测符号的使用

② 当需要在现场（指不在车间或制造地）检测时，把现场符号置于箭头和基准线的连接处，如图6.3-70所示。

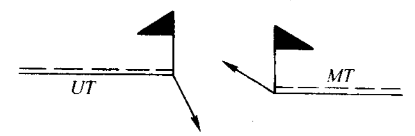


图6.3-70　现场检测符号的使用

③ 当需要指明射线方向时，可用射线方向符号以所需的角度在图上表示。若有必要，还可标明该角度的数值。如图6.3-71a，表示在箭头侧应进行射线检测，射线方向与工件的法线方向夹角为30°；图6.3-71b说明在箭头侧应进行中子射线检测，射线方向与工件垂直。

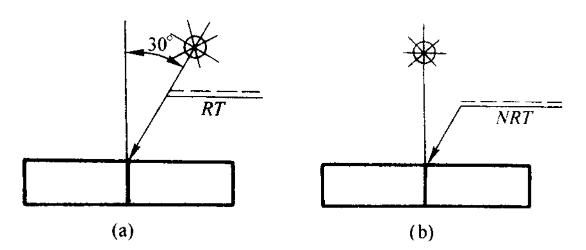


图6.3-71　射线方向符号的使用

4）技术说明、规范和参考标准的标注　如果用于指定的指示而没有用其他方式提供，可以把该指示放在无损检测符号的尾部。图6.3-72a说明箭头侧的射线探伤应按GB/T 3323进行。

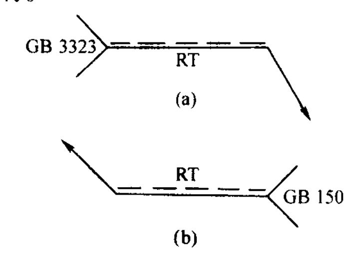


图6.3-72　尾部说明

5）检测长度的标注

① 当只需检测焊缝或零件的某一部分时，应将该部分的长度标在检测方法代号的右侧，如果长度单位为mm，则不需标明，否则应注明长度单位，如图6.3-73所示。

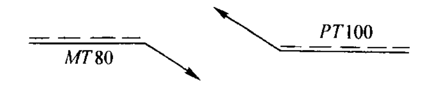


图6.3-73　检测长度的表示

② 为了说明检测部分的确切位置及其长度，应使用长度标定线。如图6.3-74说明在距工件右端60 mm的长度范围内和距右端160～220 mm的长度范围内的箭头侧和非箭头侧均应进行磁粉探伤。

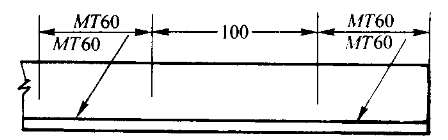


图6.3-74　检测位置的表示

③ 当零件全长都要检测时，无损检测符号中不必包含长度。

④ 当焊缝或零件不需全长检测时，检测长度可用合适的百分比标注在检测方法代号右侧，检测位置要用某个指定的规程确定，该规程可标注在无损检测符号的尾部。图6.3-75a说明在箭头侧全长25%的范围内应进行射线探伤。

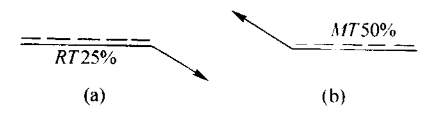


图6.3-75　局部检测的标注

6）抽检数目的标注　当需要在某一接头或零件任意位置上进行抽检时，应将抽检数目标在检测方法代号之上或之下的圆括号内，并且不与基准线相邻，如图6.3-76所示。图6.3-76a说明在箭头侧任意位置上抽三处，每处抽检长度为80 mm，进行X射线检测。

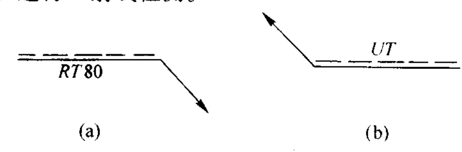


图6.3-76　抽检数目的标注

7）检测区域的标注

① 为了说明在图上表示为平面的一个区域的无损检测，应用直虚线封闭该区域，并在封闭线的每个拐角处标一个圆。该区域所需的无损检测方法的表示，如图6.3-77所示。

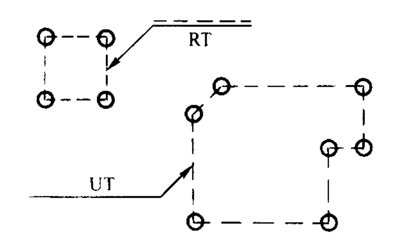


图6.3-77　平面区域检测的标注

② 对于环形区域的无损检测，应用全周检测符号和恰当的尺寸标明检测区域，如图6.3-78所示。图6.3-78a右上角的符号表示距右端面80 mm范围内的法兰孔应用磁粉进行全周检测，左下角的符号表示用射线方法检测图中未标尺寸的环形区域。图6.3-78b中的符号表示环形区域的内表面需要耐压检测，外表面需要涡流检测，图中没标尺寸，全长均需检测。

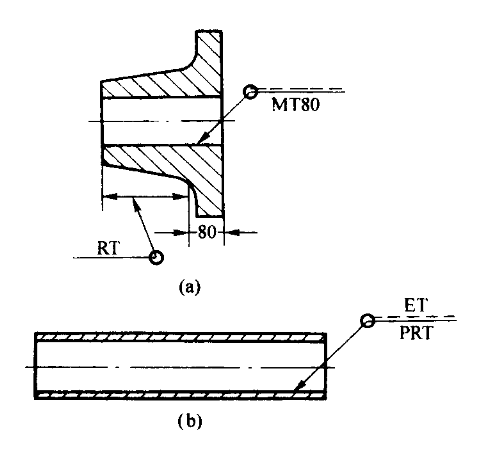


图 6.3-78　环形区域无损检测的标注

③ 声发射一般用于构件全部或大部分检测，如压力容器或管道的检测。图 6.3-79 中的符号表示该构件用声发射方法检测，符号中没有特别说明探头的位置。

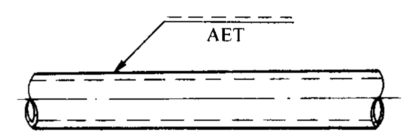


图 6.3-79　声发射检测的标注

编写：陈祝年（山东大学）



第4章　基本焊接构件的设计与计算

1　焊接梁

1.1　梁的功能与作用力

梁是承受横向弯曲作用的实腹构件。它可以在一个主平面内受弯，也可以在两个主平面内受弯。在有些场合中，梁同时承受弯曲和扭转、弯曲和轴向力等的组合载荷，见图6.4-1。梁的宽度通常是构成梁的板材厚度的10～20倍以上，而梁的长度又是梁宽度的许多倍。

设计梁时应注意分析梁受弯曲作用的载荷，它可能是一点或多点集中载荷，一种或几种均布载荷。还应区别是恒载、移动载荷、振动载荷或是冲击载荷。梁的扭转大多是由于梁的两个主轴线与载荷的作用线不重合引起。

1.2　梁的构造形式

1.2.1　梁的支承

根据需要，梁可以设计成简支的，一端或两端刚性固定的、悬臂的或多跨连续的，见图6.4-2。简支梁受力明确，构造简单，制造、安装及拆换均较方便，而且不易受温度应力影响，因而一般情况下虽然消耗材料较多，但仍得到了广泛应用。

1.2.2　梁的外形

焊接梁一般设计成等截面梁，以便于制造。但在跨度较大，弯矩变化也较大时，为了合理使用钢材，可按受力情况设计成变截面梁。梁截面的变化可以通过改变翼缘的宽度、厚度和腹板高度等措施实现。对于承受动载荷的梁，变截面处应采取过渡措施。对于较高的大跨度焊接梁，若腹板受力较小，可设计成空腹梁以减轻梁的质量。

表6.4-1示出常见的工字梁外形。

1.2.3　梁的截面形式

焊接梁常用的截面形式有工字形和箱形。工字梁主要用于一个主平面承受弯矩的情况，箱形梁多用于两个主平面承受弯矩的情况。后者因是封闭截面，还具有较好的抗扭能力和抗蚀能力。

（1）工字梁的截面形式

焊接工字梁常用的截面形式见图6.4-3。图6.4-3a是由三块钢板组焊成的工字梁，结构简单，焊接工作量少，广泛应用。图6.4-3b是增加翼缘厚度的结构。图6.4-3c是增加型钢高度的结构，既可提高承载能力，又使焊缝避开了受力的复杂位置。图6.4-3d是用槽钢作上翼缘的工字梁，可提高上翼缘的稳定性。当需要用纵向肋提高腹板上部稳定性时，用图6.4-3e结构可减少焊接量。图6.4-3f是局部加厚腹板的结构，其上部可承受较大的集中载荷。

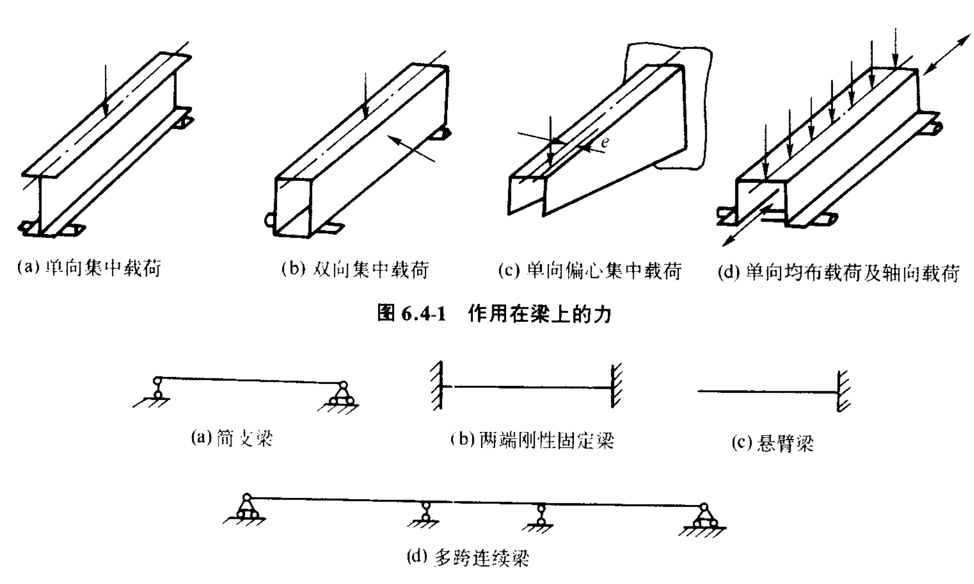
（2）箱形梁的截面形式

设计封闭截面的箱形梁时，需考虑内部焊缝的可达性和施焊时的通风等问题。

箱形梁的常用截面形式见图6.4-4。由型钢组焊成的箱形梁（见图6.4-4a）焊接工作量少，备料和装配较简便，应优先选用。尺寸稍大的梁可用型钢和钢板组焊而成（见图6.4-4b、c）。尺寸较大的梁需用钢板拼焊而成（见图6.4-4d、e）。图6.4-4f、g是钢板经压型后再组焊成的梁，焊接量少，但需增加冲压设备，通常在大批量生产中采用。图6.4-4h为圆形空心截面梁，先将钢板卷成圆筒形，再用直缝或螺旋缝连接。直缝的焊后因焊缝纵向收缩，常引起弯曲变形。图6.4-4i为Π形截面梁其截面不封闭，抗扭性能差，只在内部需安装机件时采用。

1.3　焊接梁的设计与计算

设计焊接钢梁时，首先应根据其工作特点选择合理的截面形式，根据强度、局部稳定、刚度和经济条件，初步确定梁高和截面各部分尺寸，然后对梁的强度、刚度和稳定性进行验算。对于直接承受动力载荷作用的梁，必要时应根据相关规范的规定进行疲劳验算。本节将按《钢结构设计规范》（GB 50017—2003）的有关规定，结合其他资料介绍焊接钢梁的计算方法。



(a) 单向集中载荷　(b) 双向集中载荷　(c) 单向偏心集中载荷　(d) 单向均布载荷及轴向载荷

图6.4-1　作用在梁上的力

(a) 简支梁　(b) 两端刚性固定梁　(c) 悬臂梁

(d) 多跨连续梁

图6.4-2　梁的计算简图

表 6.4-1　焊接工字梁外形

简　　图	说　　明
	等截面梁：结构简单，制造方便
	多层翼缘梁：局部增加外层翼缘板以改变梁的截面
≤1:4	不等厚翼缘对接梁：厚翼缘板应有一过渡段，坡度不大于1/4
≤1:4 ≤1:4	变翼缘宽度梁：宽板应向窄板逐渐过渡，并以对接焊缝连接
≤1:3～4 R	鱼腹梁：改变梁的腹板高度，高度变化处应有较大圆弧过渡
	楔形梁：腹板高度连续变化，常作悬臂梁
	空腹梁：在腹板受力较小处开孔，孔边应光滑无毛刺
h h h	蜂窝梁：用较高的工字钢经切割、错位焊接而成，其承载能力比原工字钢高 30%～50%

(a)　(b)　(c)　(d)　(e)　(f)

图 6.4-3　焊接工字梁截面形式

1.3.1　梁的刚度控制和强度计算

（1）梁的刚度控制

1）焊接梁在等效标准静力载荷作用下的挠度 v，按式（6.4-1）控制：

$$v \leqslant [v] \tag{6.4-1}$$

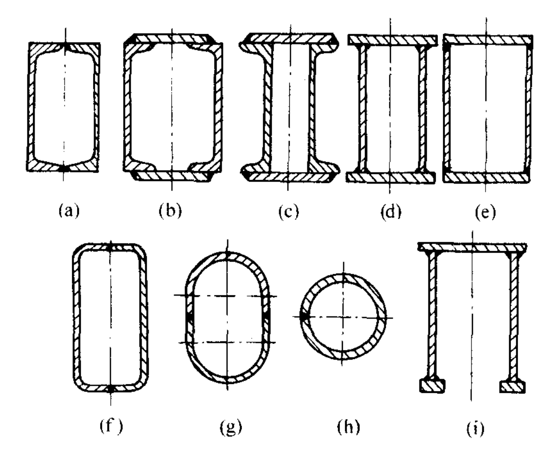


图 6.4-4　焊接箱形梁的截面形式

式中，$[v]$ 为焊接梁根据不同使用要求所规定的挠度允许值，可按本篇第 1 章表 6.1-11 取用。

2）在设有重级工业制吊车的厂房中，跨间每侧吊车梁的制动结构，由一台最大吊车横向水平载荷所产生的拱度不宜超过制动结构跨度的 1/2 200。

3）在均布载荷作用下，满足刚度条件的双轴对称焊接工字形简支钢梁的最小梁高可按表 6.4-2 采用。对于其他载荷分布形式的工字形简支梁，在初选截面时，也可按该表确定梁高。

（2）梁的强度计算

在主平面内受弯的焊接梁，应按表 6.4-3 所列公式计算强度。

表 6.4-2　简支钢梁的最小高度 h_{min}

$[v]/l$	1/1 000	1/800	1/750	1/700	1/600	
h_{min}/l	1/6	1/7.5	1/8	1/8.5	1/10	
$[v]/l$	1/500	1/400	1/350	1/300	1/250	1/200
h_{min}/l	1/12	1/15	1/17	1/20	1/24	1/30

注：1. 表中所列数值仅适用于 Q235 钢。对于其他钢号的钢梁，表中数值应乘以 $f_y/235$，其中 f_y 为所用钢材的屈服点：对 Q235 钢，取 f_y = 235 MPa；对 Q345 钢，取 f_y = 345 MPa；对 Q390 钢，取 f_y = 390 MPa。

2. 直接承受动力作用和冲击作用的焊接梁，应满足动刚度的要求，梁的高度应满足下式的要求：

$$h \geqslant \frac{l}{18} \tag{6.4-2}$$

3. 表中和式（6.4-2）中 l 为简支梁的跨度，表中 $[v]$ 为梁的允许挠度，参见表 6.1-11。

1.3.2　梁的整体稳定性计算

（1）不需进行整体稳定性验算的条件

焊接梁符合下列情况之一时，可不计算梁的整体稳定性。

1）有铺板（各种钢肋混凝土板和钢板）密铺在梁的受压翼缘上并与其牢固相连、能阻止梁受压翼缘的侧向位移。

2）工字形截面简支梁受压翼缘的自由长度 l_1 与其宽度 b_1 之比不超过表 6.4-5 所规定的数值。

3）两端简支的箱形截面梁，当不满足第 1）款的条件时，其截面高度 h 与两腹板间距 b_0（见图 6.4-5）之比应满足 $h/b_0 \leqslant 6$，且受压翼缘的自由长度 l_1 与 b_0 之比满足 $l_1/b_0 \leqslant 95\left(\frac{235}{f_y}\right)$。

表 6.4-3　钢梁强度计算公式

项次	计算内容		计算公式	备　注
1	正应力	单向受弯	$\frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} \leqslant f$ (6.4-3)	
		双向受弯	$\frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} + \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leqslant f$ (6.4-4)	
2	切应力		$\tau = \frac{VS}{It_w} \leqslant f_v$ (6.4-5)	
3	局部压应力		$\sigma_c = \frac{\psi F}{t_w l_z}$ (6.4-6) 式中　$l_z = a + 2h_y$ (6.4-7)	梁在承受固定集中载荷处无加强肋，或承受移动载荷（如轮压）作用时，才作此项计算
4	折算应力		$\sqrt{\sigma^2 + \sigma_c^2 - \sigma\sigma_c + 3\tau^2} \leqslant \beta_1 f$ (6.4-8) $\sigma = \frac{M}{I_n} y$ (6.4-9)	在腹板计算高度边缘处，若同时受有较大的正应力 σ，切应力 τ 和局部压应力 σ_c 或同时受有较大的 σ 和 τ 时，应作此项计算

注：M、M_x、M_y 为计算正应力 σ 之弯矩、绕 x 和 y 轴的弯矩（对工字形截面，x 轴为强轴，y 轴为弱轴）；W_{nx}、W_{ny} 为对 x 轴和 y 轴的净截面抵抗矩；γ_x、γ_y 为截面塑性发展系数，按表 6.4-4 规定采用；f 为钢材的抗弯强度设计值；V 为计算截面沿腹板平面作用的剪切力；S 为计算切应力处以上毛截面对中和轴的面积矩；I 为毛截面惯性矩；t_w 为腹板厚度；f_v 为钢材的抗剪强度设计值；F 为集中载荷，对动力载荷应考虑动力系数；ψ 为集中载荷增大系数：对重级工作制吊车梁，$\psi = 1.35$，对其他梁及支座处，$\psi = 1.0$；l_z 为集中载荷在腹板计算高度边缘的假定分布长度（腹板计算高度 h_0：对轧制型钢梁，为腹板与上、下翼缘相接处两内弧起点间的距离，对焊接板梁，为腹板高度。）按表 6.4-3 中的式（6.4-7）计算，但在支座处，应根据支座具体尺寸，按式（6.4-7）计算；a 为集中载荷沿受弯构件跨度方向的支承长度，对吊车梁可取为 50 mm；h_y 为自吊车梁轨顶或其他梁顶面至腹板计算高度上边缘的距离；σ、τ、σ_c 为腹板计算高度边缘同一点上同时产生的正应力、切应力和局部压应力，分别按表 6.4-3 的式（6.4-9）、式（6.4-5）和（6.4-6）计算；I_n 为净截面惯性矩；y 为所计算点至中和轴的距离；β_1 为计算折算应力的强度设计值增大系数：当 σ 与 σ_c 异号时，取 $\beta_1 = 1.2$；当 σ 与 σ_c 同号或当 $\sigma_c = 0$ 时，取 $\beta_1 = 1.1$。

表 6.4-4　截面塑性发展系数 γ_x、γ_y

项　次	截面形式	γ_x	γ_y
1	x—x, y—y 截面图	1.05	1.2
2	x—x, y—y 截面图		1.05
3	x—x, y—y, 1, 2 截面图	$\gamma_{x1} = 1.05$ $\gamma_{x2} = 1.2$	1.2
4	x—x, y—y, 1, 2 截面图		1.05
5	x—x, y—y 截面图	1.2	1.2

38

续表 6.4-4

项　次	截　面　形　式	γ_x	γ_y
6		1.15	1.15
7		1.0	1.05
8			1.0

注：1. 当压弯构件受压翼缘的自由外伸宽度与其厚度之比大于 $13\sqrt{235/f_y}$ 而不超过表 6.4-27 的规定时，应取 $\gamma_x = 1.0$。

2. 当构件直接承受动力载荷作用时，取 $\gamma_x = \gamma_y = 1.0$。

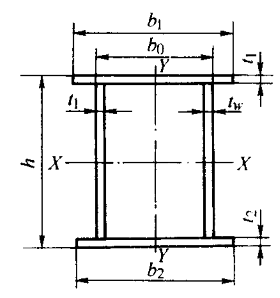


图 6.4-5　箱形截面

表 6.4-5　工字形截面简支梁不需计算整体稳定性最大 l_1/b_1 值

载荷情况 / 内容	跨中无侧向支承点的梁：载荷作用在上翼缘	跨中无侧向支承点的梁：载荷作用在下翼缘	跨中有侧向支承点的梁不论载荷作用于何处
l_1/b_1	13	20	16

注：1. 本表数值适用于 Q235 钢，其他钢号的梁不需计算整体稳定性最大 l_1/b_1 值，应取 Q235 钢的数值乘以 $\sqrt{235/f_y}$。

2. 受压翼缘的自由长度 l_1 应按下列规定采用：

1）跨中无侧向支承点时，为梁的跨度；

2）跨中有侧向支承点时，为受压翼缘侧向支承点间的距离。

3. 梁的支座处，应采取构造措施以防止梁端截面的扭转。

（2）焊接梁的整体稳定性计算公式

1）焊接梁当不满足上述要求时，应按表 6.4-6 所列公式计算整体稳定性。

表 6.4-6　焊接梁整体稳定性计算公式

项次	受力情况	计算公式	备注
1	仅在最大刚度主平面内受弯	$\dfrac{M_x}{\varphi_b W_x} \leqslant f$　(6.4-10)	在支座处应采取构造措施，防止端部截面扭转
2	两个主平面受弯的工字形截面	$\dfrac{M_x}{\varphi_b W_x} + \dfrac{M_y}{\gamma_y W_y} \leqslant f$　(6.4-11)	

注：M_x、M_y 为绕强轴和弱轴作用的最大弯矩；W_x、W_y 为按受压边缘纤维确定的对强轴和弱轴毛截面抵抗矩；γ_y 为截面塑性发展系数，按表 6.4-4 的规定采用；φ_b 为绕强轴弯曲所确定的整体稳定系数，可按相应规范确定，也可按下述规定通过计算确定。

2）对于焊接工字形截面的简支梁和双轴对称工字形截面的悬臂梁，可按式（6.4-12）确定 φ_b：

$$\varphi_b = \beta_b \frac{4\,320}{\lambda_y^2} \cdot \frac{Ah}{W_x}\left[\sqrt{1+\left(\frac{\lambda_y t_1}{4.4\,h}\right)^2} + \eta_b\right]\frac{235}{f_y} \qquad (6.4\text{-}12)$$

式中，β_b 为梁整体稳定的等效弯矩系数，按下列规定用，简支梁时，按表 6.4-7 采用；悬臂梁时，按表 6.4-8 采用；$\lambda_y = \dfrac{l_1}{i_y}$ 为梁在侧向支承点间对截面弱轴 $y-y$ 的长细比；l_1 为简支梁时，按表 6.4-5 注 2 的规定采用；悬臂梁时，为悬伸长度；i_y 为毛截面对 y 轴的回转半径；A 为梁的毛截面面积；h、t_1 为梁截面的全高和受压翼缘厚度；η_b 为截面不对称影响系数，对双轴对称工字形截面（图 6.4-6a）$\eta_b = 0$，对单轴对称工字形截面（图 6.4-6b、c）加强受压翼缘 $\eta_b = 0.8\ (2a_b - 1)$，加强受压翼缘 $\eta_b = 2a_b - 1$，$a_b = \dfrac{I_1}{I_1 + I_2}$ 为截面不对称程度；I_1、I_2 分别为受压翼缘和受拉翼缘对 y 轴的惯性矩。

当按式（6.4-12）算得的 φ_b 值大于 0.60 时，应按表 6.4-9 查出相应的 φ'_b 代替 φ_b 值。

3）承受均匀弯曲的梁，当其 $\lambda_y \leqslant 120\sqrt{235/f_y}$ 时。也可按表 6.4-10 中的近似公式计算整体稳定系数 φ_b，当算得 $\varphi_b > 0.60$ 时，不需按表 6.4-9 进行修正。

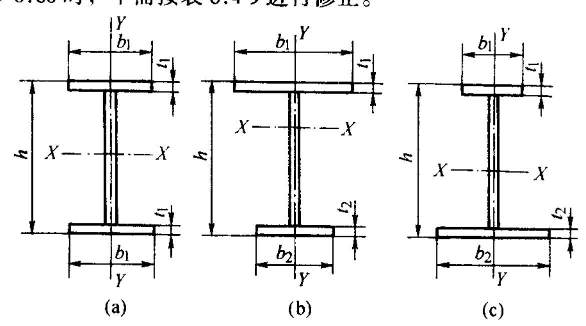


图 6.4-6　焊接工字形截面

1.3.3　梁的局部稳定性计算

（1）腹板加强肋的设置

1）为保证焊接组合梁腹板的局部稳定性，应按表 6.4-11 的规定在腹板上配置加强肋（见图 6.4-7）。

2）腹板加强肋的截面尺寸与构造要求按表 6.4-13 的规定确定。

（2）梁腹板局部稳定的计算　当梁腹板的加强肋位置不是按表 6.4-11 的规定配置时，可按《设计规范》中所列公式验算腹板的局部稳定性。

（3）梁受压翼缘宽厚比的规定

梁受压翼缘的宽厚比应符合表 6.4-14 的规定。



表 6.4-7　工字形截面简支梁的系数 β_b

序　号	侧向支承	载　　荷		$\xi=\frac{l_1t_1}{b_1h}$		适用范围
				$\xi\leqslant2.0$	$\xi>2.0$	
1	跨中无侧向支承	均布载荷作用在	上翼缘	$0.69+0.13\xi$	0.95	图 6.4-6a、b 的截面
2			下翼缘	$1.73-0.20\xi$	1.33	
3		集中载荷作用在	上翼缘	$0.73+0.18\xi$	1.09	
4			下翼缘	$2.23-0.28\xi$	1.67	
5	跨度中点有一个侧向支承点	均布载荷作用在	上翼缘	1.15		图 6.4-6 中的所有截面
6			下翼缘	1.40		
7		集中载荷作用在截面高度上任意位置		1.75		
8	跨中有不少于两个等距离侧向支承点	任意载荷作用在	上翼缘	1.20		
9			下翼缘	1.40		
10	梁端有弯矩，但跨中无荷载作用			$1.75-1.05\left(\frac{M_2}{M_1}\right)+0.3\left(\frac{M_2}{M_1}\right)^2\leqslant2.3$		

注：1. M_1、M_2 为梁的端弯矩，使梁产生同向曲率时，M_1、M_2 取同号，产生反向曲率时取异号，$|M_1|\geqslant|M_2|$；b_1 为受压翼缘宽度；

2. 表中项次 3、4 和 7 的集中载荷是指一个或少数几个集中载荷位于跨中央附近的情况，对其他情况的集中载荷，应按表中项次 1、2、5、6 内的数值采用。

3. 表中项次 8、9 的 β_b，当集中载荷作用在侧向支承点处时，取 $\beta_b=1.20$。

4. 载荷作用在上翼缘系数指载荷作用点在翼缘表面，方向指向截面形心；载荷作用下翼缘系指载荷作用点在翼缘表面，方向背向截面形心。

5. 对 $a_b>0.8$ 的加强受压翼缘工字形截面，下列情况的 β_b 值应乘以相应的系数：

序号 1	当 $\xi\leqslant1.0$ 时	0.95
序号 3	当 $\xi\leqslant0.5$ 时	0.90
	当 $0.5<\xi\leqslant1.0$ 时	0.95

表 6.4-8　双轴对称工字形等截面悬臂梁的系数 β_b

序　号	载 荷 形 式		$\xi=\frac{l_1t}{bh}$		
			$0.60\leqslant\xi\leqslant1.24$	$1.24<\xi\leqslant1.96$	$1.96<\xi\leqslant3.10$
1	一个集中载荷作用在自由端	上翼缘	$0.21+0.67\xi$	$0.72+0.26\xi$	$1.17+0.03\xi$
2		下翼缘	$2.94-0.65\xi$	$2.64-0.40\xi$	$2.15-0.15\xi$
3	均布载荷作用在上翼缘		$0.62+0.82\xi$	$1.25+0.31\xi$	$1.66+0.10\xi$

注：本表是按支端为固定的情况确定的，当用于由邻跨延伸出来的伸臂梁时，应在构造上采取措施加强支承处的抗扭能力。

表 6.4-9　整体稳定系数 φ_b'

φ_b	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25
φ_b'	0.60	0.627	0.653	0.676	0.697	0.715	0.732	0.748	0.762	0.775	0.788	0.799	0.809	0.819
φ_b	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.60	1.80	2.00	2.25	2.50	3.00	3.50	$\geqslant4.00$	
φ_b'	0.828	0.837	0.845	0.852	0.859	0.872	0.894	0.913	0.931	0.946	0.970	0.987	1.000	

表 6.4-10　φ_b 的近似计算公式

序号	截 面 形 式			近似计算公式	备注
1	工字形截面	双轴对称时		$\varphi_b=1.07-\frac{\lambda_y^2}{44\,000}\times\frac{f_y}{235}$　(6.4-13)	$\varphi_b\leqslant1.0$
2		单轴对称时		$\varphi_b=1.07-\frac{W_{1x}}{(2a_b+0.1)\ Ah}\times\frac{\lambda_y^2}{14\,000}\times\frac{f_y}{235}$　(6.4-14)	
3	T形截面	弯矩使翼缘受压	双角钢组成的T形截面	$\varphi_b=1-0.001\,7\,\lambda_y\sqrt{f_y/235}$　(6.4-15)	
4			两板组合 T 形截面	$\varphi_b=1-0.002\,2\,\lambda_y\sqrt{f_y/235}$　(6.4-16)	
5		弯矩使翼缘受拉		$\varphi_b=1.0$　(6.4-17)	



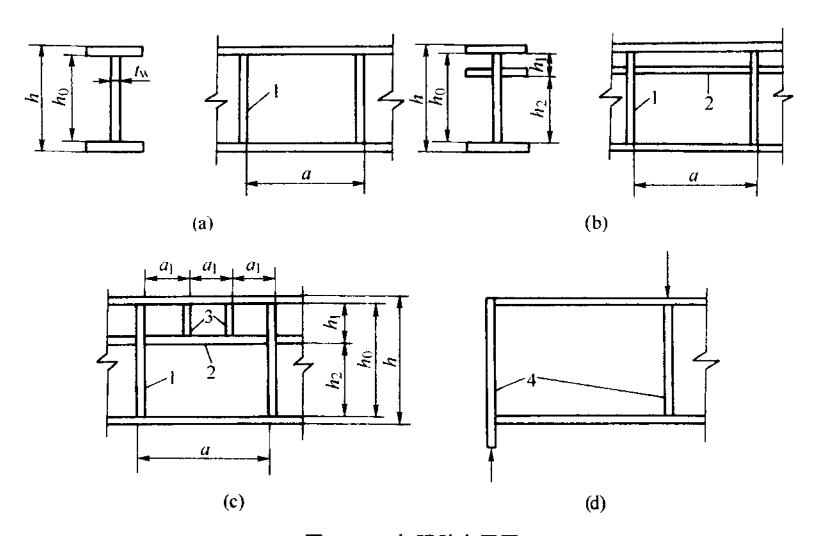


图 6.4-7　加强肋布置图

1—横向加强肋；2—纵向加强肋；3—短加强肋；4—支承加强肋

表 6.4-11　梁腹板加劲的配置与间距计算表

序号	腹板宽厚比或所处位置	加强肋配置规定与间距 a 的计算	备　注
1	$\frac{h_0}{t_w} \leqslant 80\sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$\sigma_c=0$ 时，可不配置加强肋	
2		$\sigma_c \neq 0$ 时，宜按构造配置横向加强肋，可取 $a \leqslant 2h_0$	见图 6.4-7a
3	$80\sqrt{\frac{235}{f_y}} \leqslant \frac{h_0}{t_w} \leqslant 100\sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$\sigma_c=0$ 时，可按构造配置横向加强肋，取 $a \leqslant 2.5\ h_0$	
4	$80\sqrt{\frac{235}{f_y}} < \frac{h_0}{t_w} \leqslant 170\sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$\sigma_c=0$ 时，应配置横向加强肋，其间距 a 应符合下列要求。 （1）当 $\frac{h_0}{t_w}\sqrt{\eta\tau} \leqslant 1\ 200$ 时，应取 a 不超过本表 2、3 项规定的最大间距 （2）当 $1\ 200 < \frac{h_0}{t_w}\sqrt{\eta\tau} \leqslant 1\ 500$ 时， $a \leqslant \frac{500\ h_0}{\frac{h_0}{t_w}\sqrt{\eta\tau}-1\ 000}$　(6.4-18) （3）当 $\frac{h_0}{t_w}\sqrt{\eta\tau} > 1\ 500$ 时 $a \leqslant \frac{1\ 000\ h_0}{\frac{h_0}{t_w}\sqrt{\eta\tau}-500}$　(6.4-19)	见图 6.4-7a 式（6.4-18）、式（6.4-19）右端算得的值，若大于本项第（1）条规定的最大间距时，应取 a 不超过最大间距。横向加强肋的最小间距不为 $0.5h_0$
5	$80\sqrt{\frac{235}{f_y}} < \frac{h_0}{t_w} \leqslant 170\sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$\sigma_c \neq 0$ 时，应配置横向加强肋。当简支吊车梁的腹板仅用横向加强肋加强时，加强肋的间距 a 应按《设计规范》计算确定	见图 6.4-7（a） a 的最小间距为 $0.5\ h_0$
6	$\frac{h_0}{t_w} > 170\sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$\sigma_c=0$ 时，应配置横向加强肋和在应力较大的受压区配置纵向加强肋 1）纵向加强肋至腹板计算高度受压边缘的距离 h_1 按式（6.4-20）计算。 $h_1 \leqslant \frac{1\ 120t_w}{\sqrt{\sigma}}$　(6.4-20) h_1 应在 $\frac{h_0}{5} \sim \frac{h_0}{4}$ 范围内 2）横向加强肋间距 a 按式（6.4-21）及式（6.4-22）计算。 当 $\frac{h_2}{t_w}\sqrt{\tau}$ 时 $\leqslant 1\ 200$ 时，按最大间距采用 当 $1\ 200 \leqslant \frac{h_2}{t_w}\sqrt{\tau} > 1\ 500$ 时 $a \leqslant \frac{500h_2}{\frac{h_2}{t_w}\sqrt{\tau}-1\ 000}$　(6.4-21) 当 $\frac{h_2}{t_w}\sqrt{\tau} > 1\ 500$ 时 $a \leqslant \frac{1\ 000\ h_2}{\frac{h_2}{t_w}\sqrt{\tau}-500}$　(6.4-22)	见图 6.4-7 当按式（6.4-21）、式（6.4-22）算得的 a 值大于 $2h_2$ 时，应取 $a=2h_2$

续表 6.4-11

序号	腹板宽度比或所处位置	加强肋配置规定与间距 a 的计算	备　注
7	$\frac{h_0}{t_w}>170\sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$\sigma_c\neq0$ 时，当简支吊车梁的腹板同时用横向和纵向加强肋加强时（见图 6.4-7b），应按 GBJ 17—88 计算确定	当算得的 h_1 值小于 $\frac{h_0}{5}$ 时，尚应在腹板受压区配置短加强肋（见图 6.4-7c）并应满足本表项次 8 的规定
8	$\frac{h_0}{t_w}>170\sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$\sigma_c\neq0$ 时，当简支吊车梁的腹板同时用横向、纵向加强肋和在受压区用短加肋加强时（见图 6.4-7c），h_1 在 $\frac{h_0}{5}\sim\frac{h_0}{4}$ 之间取值，取 $a=2h_2$，按等分 a 的要求假设 $a_1\geqslant0.75h_1$，然后按 GBJ 17—88 的规定，进行验算和调整	
9	梁支座处和上翼缘受有较大固定集中荷载处	宜设置支承加强肋（见图 6.4-7d）并应按表 6.4-13 的规定，进行计算	

注：h_0、t_w、h_1、a、a_1 为梁截面和加强肋位置的几何参数，见图 6.4-7；τ 为梁腹板的平均切应力，对项次 4 和 6 的所有公式，为考虑梁段内的最大剪力产生的平均切应力，应按 $\tau=V/(h_wt_w)$ 计算，单位为 MPa，h_w 为腹板的高度；η 为考虑 σ 影响的增大系数，应按表 6.4-12 采用。

表 6.4-12　系数 η

$\sigma\left(\frac{h_0}{100t_w}\right)^2$	0	100	140	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380
η	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.09	1.10	1.12	1.14	1.16	1.18
$\sigma\left(\frac{h_0}{100t_w}\right)^2$	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	
η	1.21	1.24	1.27	1.31	1.35	1.40	1.46	1.53	1.61	1.71	1.84	2.01	2.24	

注：表中的系数 η 系按式（6.4-23）计算得：

$$\eta=\frac{1}{\sqrt{1-\left[\frac{\sigma}{715}\left(\frac{h_0}{100t_w}\right)^2\right]^2}}\qquad(6.4\text{-}23)$$

式中，σ 为腹板计算高度边缘的弯曲压应力 MPa。对项次 4 中的所有公式和式（6.4-23），σ 为与 τ 同一截面的腹板计算高度边缘的弯曲应力应按 $\sigma=\frac{My_1}{I}$ 计算，I 为梁的毛截面惯性矩，y_1 为腹板按计算高度受压边缘至中和轴的距离；对项次 6，σ 为所考虑区段内最大弯矩处腹板计算高度边缘的弯曲压应力，应按 $\sigma=\frac{M_{max}y_1}{I}$ 计算；σ_c 为梁腹板计算高度边缘的局部压应力（MPa），按式（6.4-6）计算，但系数 ψ 取 1.0。

表 6.4-13　腹板加强肋的截面尺寸

序号	加强肋配置情况			截 面 尺 寸	备　注
1	横向加强肋	无纵向加强肋	在腹板两侧成对配置时	外伸宽度 $b_s\geqslant\frac{h_0}{30}+40$ mm　(6.4-24) 厚度 $t_s\geqslant\frac{b_s}{15}$　(6.4-25)	
			在腹板一侧配置时	外伸宽度 $b_s\geqslant\frac{h_0}{25}+48$ mm　(6.4-26) t_s 按式（6.4-25）计算	支承加强肋和重级工作制吊车梁的加强肋不应采用单侧配置
		有纵向加强肋时		b_s、t_s 按式（6.4-24）～式（6.4-26）计算，且 $I_z\geqslant3h_0t_w^3$　(6.4-27)	
2	纵向加强肋			当 $\frac{a}{h_0}\leqslant0.85$ 时，$I_y\geqslant1.5h_0t_w^3$　(6.4-28) 当 $\frac{a}{h_0}>0.85$ 时 $I_y\geqslant\left(2.5-0.45\frac{a}{h_0}\right)\left(\frac{a}{h_0}\right)^2h_0t_w$　(6.4-29)	
3	短加强肋			外伸宽度：$b_{ss}=0.7b_{ss}\sim b_s$　(6.4-30) 厚度：$t_{ss}=\frac{b_{ss}}{15}$　(6.4-31)	短加强肋的最小间距为 $0.75h_1$



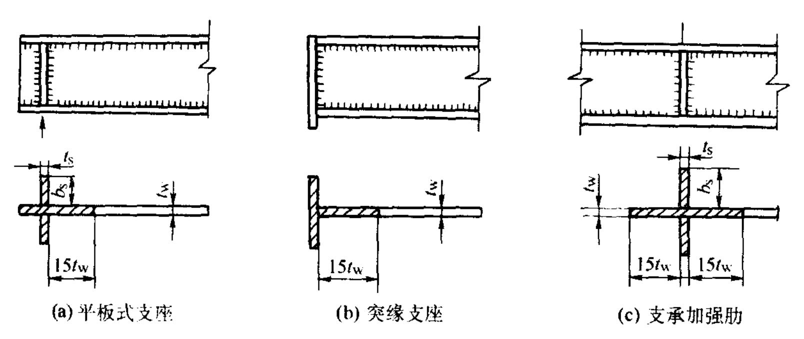
续表 6.4-13

序号	加强肋配置情况	截面尺寸	备注
4	支承加强肋	应按承受梁支座反力或固定集中载荷的轴心受压构件计算其在腹板平面外的稳定性。此受压构件的截面应包括加强肋和加强肋每侧 $15t_w\sqrt{\frac{235}{f_y}}$ 范围内的腹板面积（见图 6.4-8）。其计算长度取 h_0	按式（6.4-52）计算

注：1. I_z 为横向加强肋绕梁纵轴的惯性矩；I_y 为纵向加强肋绕梁截面竖轴的惯性矩。

2. 加强肋宜在腹板两侧成对配置，也可单侧配置。在腹板两侧成对配置的加强肋，其截面惯性矩应按梁腹板中心线为轴线进行计算；在腹板一侧配置的加强肋，其截面惯性矩应按与加强肋相连的腹板边缘为轴线进行计算。

3. 用型钢（工字钢、槽钢、肢尖焊于腹板的角钢）作成的加强肋，其截面惯性矩不得小于相应钢板加强肋的惯性矩。



(a) 平板式支座　(b) 突缘支座　(c) 支承加强肋

图 6.4-8　支承加强肋的计算截面

表 6.4-14　梁受压翼缘宽厚比的规定

序号	截面形式	规定值
1		$\frac{b}{t}\leqslant 15\sqrt{\frac{235}{f_y}}$　(6.4-32)
2		$\frac{b}{t}\leqslant 15\sqrt{\frac{235}{f_y}}$ $\frac{b_0}{t}\leqslant 40\sqrt{\frac{235}{f_y}}$　(6.4-33)

表 6.4-15　焊接工字钢梁的截面选择

序号	内容	计算公式	备注
1	梁高	经济梁高 $h_e = K\sqrt{\frac{W_{nx}}{t_w}}$　(6.4-34) 最小梁高 h_{min} 按表 6.4-2 或相应刚度条件确定 最大梁高 h_{max} 由建筑设计确定	应使梁高 h 满足： $h_{min}\leqslant h\leqslant h_{max}$ $h\approx h_e$
2	腹板尺寸	按承受剪力确定腹板厚度： $t_{w1}\geqslant\frac{1.5V_{max}}{h_0 f_v}$　(6.4-35) 梁高 1～2 m 时，腹板厚度可按经验公式确定： $t_w\approx 7+\frac{3h}{1\,000}$ mm　(6.4-36) 当梁腹板中不设纵向加强肋时，腹板厚度应满足： $t_{w3}\geqslant\frac{h_0}{170}\sqrt{\frac{f_y}{235}}$　(6.4-37) 若设纵向加强肋时，可取： $t_{w3}=\left(\frac{1}{250}\sim\frac{1}{170}\right)h_0\sqrt{\frac{f_y}{235}}$　(6.4-38)	腹板高度 h_0 较梁高 h 小 2 倍翼缘板厚度，同时应符合钢板规格。腹板厚度应符合钢板规格，一般不小于 8 mm



续表 6.4-15

序号	内　容	计 算 公 式	备　　注
3	翼缘尺寸	一个翼缘板所需的面积［见图 6.4-6（a）］ $b_1 t_1 = \frac{2I_x}{h_0^2} - \frac{t_w h_0}{6}$　(6.4-39) 翼缘板宽度 b_1 可在下述范围内选取： $b_1 = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}\right) h$　(6.4-40) 翼缘板的外伸宽度 b 应满足： $\frac{b}{t} \leqslant 15\sqrt{\frac{235}{f_y}}$　(6.4-32)	式（6.4-39）仅适用于双轴对称的工字形截面

注：t_w（t_{w1}、t_{w2}、t_{w3}）为腹板的厚度；b_1、b、t（t_1）分别为翼缘板的宽度、翼缘板的外伸宽度（见表 6.4-14 项次 1 图）和翼缘板的厚度；$W_{nx} = \frac{M_x}{\gamma_x f}$为梁所需要的截面抵抗矩；$M_x$、$V_{max}$为梁的最大弯矩和最大剪力；$\gamma_x$ 为截面的塑性发展系数，按表 6.4-4 规定采用；K 为系数，不变截面的焊接梁 $K = 1.2$；不变截面的焊接吊车梁 $K = 1.35$；h、h_0 为梁的截面高度和腹板计算高度；$I_x = W_{nx}\frac{h}{2}$ 为梁截面所需要的惯性矩；f、f_v 为钢材的抗弯强度设计值和抗剪强度设计值；f_y 为钢材的屈服点。

1.3.4　焊接梁设计的若干其他问题

1）焊接工字钢梁的截面选择和翼缘与腹板的连接设计

① 焊接工字钢梁的截面选择包括确定截面高度、腹板尺寸和翼缘尺寸，可按表 6.4-15 的规定和图 6.4-9 确定。

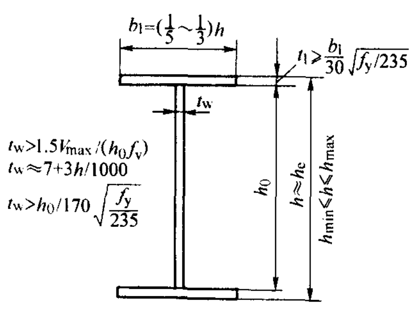


图 6.4-9　工字形梁截面尺寸

② 当翼缘与腹板用连续角焊缝连接时，角焊缝的焊脚高度 h_f 按式（6.4-41）计算。

$$h_f \geqslant \frac{1}{1.4 f_f^w}\sqrt{\left(\frac{VS_1}{I_x}\right)^2 + \left(\frac{\psi F}{l_z}\right)^2} \qquad (6.4\text{-}41)$$

式中，V 为计算截面的剪力，一般按梁的最大剪力计算；S_1 为翼缘对梁中和轴的毛截面面积矩；F 为集中载荷（吊车梁考虑动力系数）；ψ 为系数，重级工作制吊车梁取 1.35，其他梁取 1.0；l_z 为集中载荷在腹板计算高度边缘的假定分布长度，见表 6.4-3 说明。

2）梁截面沿长度的改变　简支焊接钢梁可采用沿梁长改变截面的办法达到节省钢材的目的。表 6.4-16 给出三种改变梁截面的例子，可供参考。梁的跨度等于或大于 12 m 时，改变截面较为合理，但一般沿梁的长度范围内只改变一次。在变截面处应验算梁的强度。

3）焊接钢梁的构造要求

① 焊接梁的翼缘一般用一层钢板作成，当采用两层钢板时，外层钢板与内层钢板厚度之比宜为 0.5～1.0。用做吊车梁时，外层钢板宜沿梁通长设置，并应在设计和施工中采取措施使上翼缘两层钢板紧密接触。

② 焊接梁的横向加强肋与翼缘板相连接处应切角，当切成斜角时，其宽约 $b_s/3$（但不大于 40 mm），高约 $b_s/2$（但不大于 60 mm），见图 6.4-10，b_s 为加强肋的宽度。

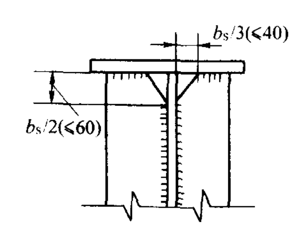


图 6.4-10　加强肋的切角

③ 梁的端部支承加强肋的下端，按端面承压强度设计值计算时，应刨平顶紧，其中突缘加强板（见图 6.4-11b）的伸出长度不得大于其厚度的 2 倍。

④ 肋板可用钢板或型钢制作，宜成对配置在腹板两侧（见图 6.4-12）。钢板横向肋板应用最广，它的截面尺寸可按表 6.4-13 确定。

4）吊车梁翼缘板或腹板的焊接拼接应采用加引弧板的焊透对接焊缝，引弧板割去处应打磨平整。

5）重级工作制和起重量 $Q \geqslant 50$ t 的中级工作制吊车梁腹板与上翼缘的 T 形连接应予焊透；焊缝质量不低于国家现行《钢结构工程施工质量验收规范》（GB 50205—2001）规定的二级焊缝标准（见图 6.4-13）。

6）吊车梁横向加强肋的上端应与上翼缘刨平顶紧并焊接。中间横向加强肋的下端宜在距受拉翼缘 50～10 mm 处断开，不应另加零件与受拉翼缘焊接（见图 6.4-14a、b），施焊时，不宜在加强肋下端起落弧。对于相当宽的箱形梁或单腹板梁，为避免受拉翼缘板在施工和运输过程中产生局部变形，可以把横向加强肋下端与加设的垫板焊住，再以纵向焊缝把垫板焊在受拉翼缘板上（见图 6.4-14c、d）。

7）重级工作制吊车梁的受拉翼缘板边缘，宜采用自动精密气割，当用手工气割或剪切机切割时，应沿全长刨边。

8）吊车梁的受拉翼缘上不得焊接悬挂设备的零件，并不宜在该处打火或焊接临时用的夹具。

1.3.5　焊接梁的拼接

焊接梁的拼接有工厂拼接和工地拼接两种。前者是受到钢材尺寸限制而在工厂进行的拼接，后者是受到运输或安装条件限制而在工地进行的拼接。拼接缝一般应布置在工作应力较低处。



表 6.4-16 梁截面沿长度改变举例

序号	改变方法	具 体 构 造
1	改变翼缘宽度	$b_1 \geqslant \frac{h}{10}$；$h_1 \geqslant 120\text{mm}$；$b_1 \geqslant \frac{b}{2}$
2	采用双层翼缘板	$\frac{t_1}{t} = 0.5 \sim 1.0$ 外层翼缘板在理论切断点处的外伸长度 l_1 应符合下列要求： 端部有正面角焊缝 当 $h_f \geqslant 0.75t_1$ 时，$l_1 \geqslant b_1$ 当 $h_f < 0.75t_1$ 时，$l_1 \geqslant 1.5b_1$ 端部无正面角焊缝 $l_1 \geqslant 2b_1$ b_1、t_1 分别为外层翼缘板的宽度和厚度；h_f 为翼缘侧面角焊缝和正角焊缝的焊脚尺寸
3	改变梁高	与下翼缘相焊；按计算并 $\geqslant \frac{h}{2}$；突缘支座；顶紧；平板式支座；$3 \sim 4$；$\approx (\frac{1}{6} \sim \frac{1}{5})l$

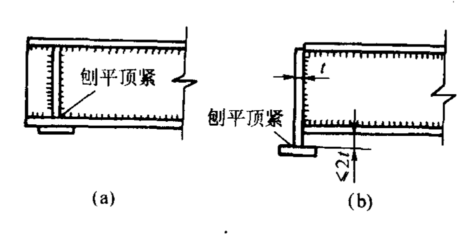
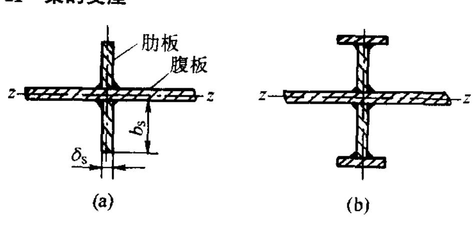
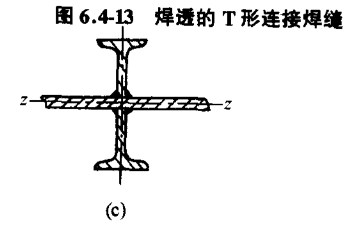
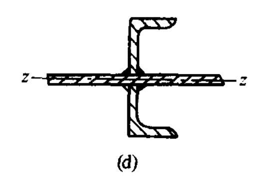


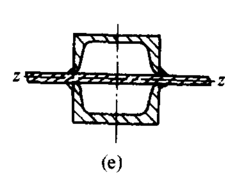
图 6.4-11 梁的支座

图 6.4-13 焊透的 T 形连接焊缝









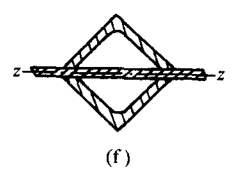


图 6.4-12 肋板的形式

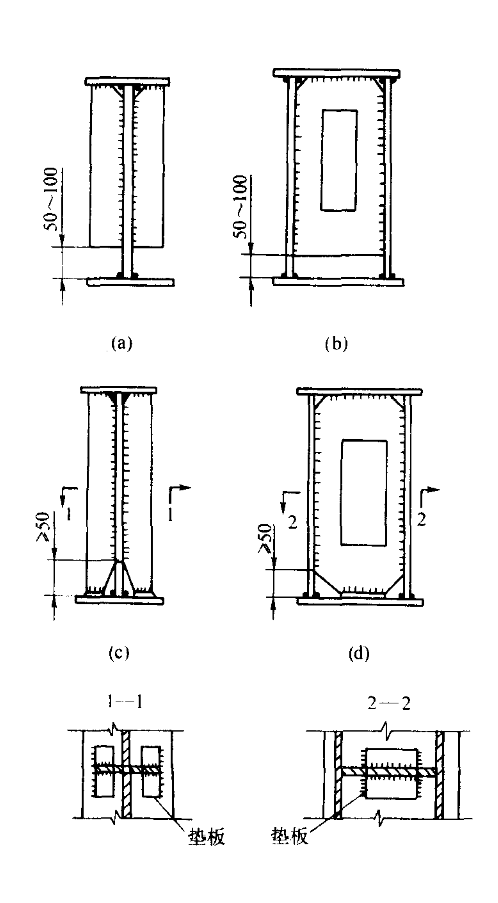


图 6.4-14 吊车梁横向加强肋的构造

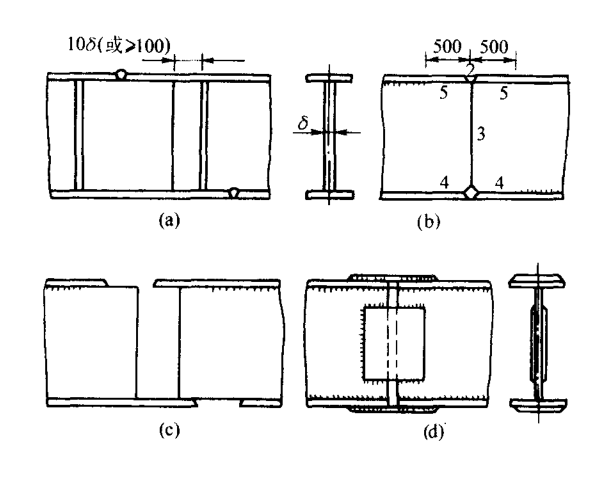


图 6.4-15 焊接梁的拼接

工厂拼接宜采用正面对接焊接，翼缘和腹板的拼接缝应错开，且不应与肋板或次梁等连接处重合，以避免焊缝集中（见图 6.4-15a）。

工地拼接一般应使翼缘和腹板在同一截面或接近于同一截面处断开，以便于运输或吊装。在同一截面断开时，为了减少焊接应力，拼接缝两侧应预留一段翼缘焊缝不焊，待焊完拼接缝后再焊（图 6.4-15b，图中数字表示施焊顺序）。若将拼接缝适当错开（图 6.4-15c），则可避免焊缝集中，改善受力情况。采用连接板拼接（图 6.4-15d）可降低制造和安装时的精度要求，但只适用于以承受静载为主的梁。

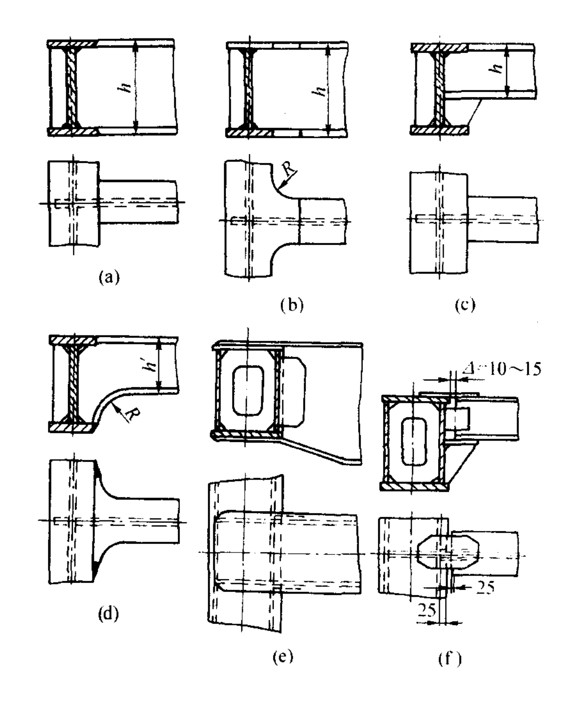


图 6.4-16 梁与梁的连接

工地拼接也可采用螺栓或铆钉连接。

1.3.6 梁与梁的连接

焊接梁常与另一方向的焊接梁或型钢梁相互连接以组成梁格结构。梁与梁的连接处通常用横向肋板局部加强，以便承受集中载荷和弯曲力矩。为了降低连接处的应力集中和附加应力，应合理设计连接处的构造形式。

梁与梁的连接主要有搭接和侧面连接两种。前者梁格高度较大，使用受到一定限制。

常用的侧面连接形式见图 6.4-16，两根梁的轴线相互垂直，上翼缘处于同一水平面。图 6.4-16a、c 适于静载工字梁的连接。对于承受动载的等高工字梁，最好使翼缘的对接缝避开拐角处，并将该处翼缘的两侧设计成较大的圆弧过渡，以减少应力集中（图 6.4-16b）；对于高度不等的梁，可采用图 6.4-16d 结构，增大次梁在连接处的高度，有利于承受次梁的支座弯矩。图 6.4-16e 是两个箱形梁的连接结构，一个梁的上下翼缘搭接在另一个梁的上下翼缘上。图 6.4-16f 是箱形梁与工字梁的连接形式，上翼缘加有连接板，降低了装配要求。

1.4 焊接梁结构设计实例

1.4.1 焊接吊车梁

（1）简介

在工业厂房中，用于支承吊车的结构构件称吊车梁（或吊车桁架），按吊车生产使用状况和吊车工作制度分为轻级、中级、重级及特重级四级。

吊车梁系统结构通常是由吊车梁（或吊车桁架）、制动结构、辅助桁架及支撑等构件组成，见图 6.4-17。

吊车梁（或吊车桁架）一般设计成简支结构，因简支结构具有传力明确、构造简单、施工方便等优点而被广泛采用。目前大部分吊车梁（或吊车桁架）均采用焊接结构或栓焊结构，按截面形式可分为实腹梁及吊车桁架两类。实腹梁的截面形式一般分为型钢梁、工字形梁和箱形梁等，见图 6.4-18。当梁跨度较大，而吊车为轻、中级且起重量不大时，可采用吊车桁架。其常用截面形式为直接支承式桁架，如图 6.4-19a 所示；若通过短梁再传递至桁架节点上时为间接支承式（见图 6.4-19b）。

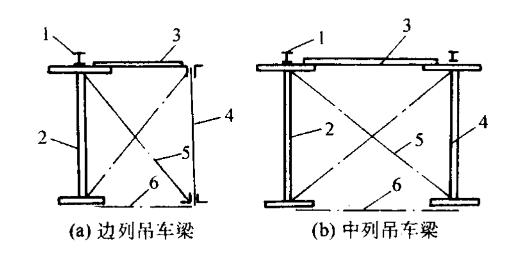


图 6.4-17　吊车梁系统构件的组成
1—轨道；2—吊车梁；3—制动结构；
4—辅助桁架；5—垂直支撑；6—下翼缘水平支撑

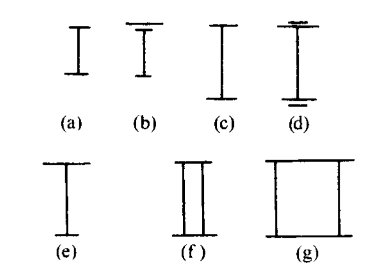


图 6.4-18　实腹吊车梁的截面形式
(a)、(b) 型钢梁；(c)、(d)、(e) 焊接工字形梁；
(f)、(g) 焊接箱形梁



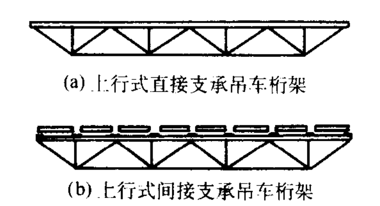


图 6.4-19　吊车桁架结构简图

设计吊车梁时，一般应注意以下几点。

① 首先应考虑吊车工作制的影响，根据工艺提供的资料，从轻、中、重和特重 4 级中确定适当的级别。

② 吊车支承结构的形式，宜综合考虑各种因素，参照表 6.4-17 合理确定。

③ 吊车梁（或吊车桁架）均应满足强度、稳定和允许挠度的要求。对重级工作制吊车梁和重级、中级工作制吊车桁架尚应进行疲劳验算。

④ 当进行强度和稳定计算时，一般按两台最大吊车的最不利组合考虑。进行疲劳验算时，则按一台最大吊车考虑（不计动力系数）。

⑤ 验算吊车梁挠度时，所考虑的吊车载荷及允许挠度按下列规定采用。

a. 竖向挠度　由两台最大吊车的轮压（不计动力系数）、吊车支承结构自重以及所作用的其他载荷等全部竖向载荷标准值所产生的吊车支承结构竖向挠度，不得超过表 6.1-11 的限值。对行驶要求更严的吊车，可再对其吊车支承结构的竖向挠度按一台最大吊车的轮压（不计动力系数）以及其他作用载荷的标准值进行补充验算，此时的允许挠度限值可参照下列值取用（l 为梁跨度）。

重级及超重级工作制吊车　$l/1\,200$
中级工作制吊车　$l/1\,000$
轻级工作制吊车　$l/800$

b. 水平挠度　在设有重级工作制吊车的厂房中，由一台最大重级吊车横向水平载荷的标准值（不考虑动力系数）使每一跨间每侧吊车梁上翼缘或吊车桁架的制动结构产生的水平挠度不宜超过其跨度的 1/2 200。

表 6.4-17　吊车支承结构的形式

吊车工作制	跨度 l/m	起重量 Q/t	宜采用吊车梁支承结构形式	宜采用制动结构形式	备　注
轻中级	< 18	不限	简支吊车梁或连续吊车梁	制动桁架	当梁 $l\leqslant 6$ m、$Q\leqslant 20$ t 时，可采用型钢梁；当 $l\leqslant 6$ m、$Q\leqslant 50$ t 时，可不设制动结构而将吊车梁上翼缘加宽
	≥18	≤50	吊车桁架	制动桁架	
		> 50	简支吊车梁或箱形吊车梁	制动桁架	
重级	< 18	不限	简支吊车梁	制动梁	必要时亦可采用连续吊车梁
	≥18	≤30	简支吊车梁或栓焊吊车桁架	制动梁	当 $Q<10$ t 时亦可采用全焊吊车桁架
		≥50	简支吊车梁或箱形吊车梁	制动梁	有施工保证时，亦可采用栓焊吊车桁架
超重级	不限	不限	简支吊车梁或箱形吊车梁	制动梁	

(2) 焊接工字形吊车梁

1) 设计要点　焊接工字形吊车梁截面一般由三块板焊接而成。当吊车梁的跨度与吊车起重量不大（$l\approx 6$ m，$Q\leqslant 50$ t）并为轻、中级工作制时，可采用上翼缘加宽的不对称截面，此时一般可不设制动结构。当吊车梁的跨度与吊车起重量较大或吊车为重级工作制时，可采用对称或不对称工字形截面，但需设置制动结构。不对称工字形截面，能充分利用材料强度使截面更趋合理。

设计的一般程序如下。

① 根据吊车梁的承载条件计算梁的内力，主要是最大横向弯矩 M_{xmax}，最大水平弯矩 M_{ymax}；支座处最大剪力 V_{xmax} 和最大水平剪力 V_{ymax} 等。

② 用表 6.4-15 的计算公式初选截面形式和截面尺寸。通常先综合考虑经济、强度和刚度等要求选定梁高 h，然后按抗剪要求定出腹板厚度 t_w。最后按强度和构造要求确定翼板的厚度 t 和宽度 b。

③ 对所选定的截面进行验算。先对选定梁的截面算出其几何特性，如面积、惯性矩、截面模和面积矩等。然后进行下列各项验算。

(a) 强度计算，按表 6.4-3 中的有关公式进行。

(b) 整体稳定和局部稳定计算。

若不设置制动结构，则按表 6.4-6 的公式计算梁的整体稳定性；若满足表 6.4-5 的条件，则可不计算梁的整体稳定性。

焊接工字形吊车梁腹板的局部稳定是由所设置的横向和纵向加强肋来保证，应按表 6.4-11 和表 6.4-12 的规定设置。加强肋截面尺寸按表 6.4-13 中的公式计算确定。

(c) 梁的刚度计算。吊车梁的竖向挠度及重级、特重级工作制吊车制动结构的水平挠度，应按全部竖载荷标准值以

简支梁计算的最大弯矩求竖向挠度，以横向水平载荷标准值求最大水平挠度，均应满足表6.1-11的相关规定。

（d）疲劳强度计算。重级工作制焊接工字形吊车梁的受拉区应按容许应力幅的方法进行疲劳计算，见本篇第3章5.2.3节。对单层翼缘板焊接工字形吊车梁应验算下列敏感部位：横向对接焊缝附近的主体金属、翼缘连接焊缝附近的主体金属、横向加劲肋下端部附近的主体金属、翼缘与腹板连接的角焊缝和支座加劲肋与腹板连接焊缝（按有效截面确定的剪应力幅计算）。分别见表6.3-20中的第3、5、6和16项。

（e）连接的计算。如对梁腹板与翼缘板的连接角焊缝，支座加劲肋与腹板、翼缘板的连接焊缝等的强度计算，以确定焊脚尺寸。

2）结构实例　图6.4-20所示为18 m工字形吊车梁的焊接结构图。该吊车梁的跨度为18 m，支承的吊车为重级，起重量为20 t；吊车重为168.5t，小车重63.72 t，最大限度轮压35.5 t，轨道型号为QU120。吊车梁端部采用突缘支座。

该吊车梁结构有以下主要特点：总体结构简单，易于制造。材质采用Q345（16Mn）钢，以降低自重；腹板与上翼缘采用焊透的T形接头，以保证轮压力充分传递。而与下翼缘则采用贴角焊缝连接。四条纵向焊缝均采用自动焊，其余焊缝为焊条电弧焊。自动焊丝为H08Mn2Si，焊条为E5015；采用变腹板高度梁，在梁端部截面突变。该部位应力复杂，采用梁端腹板局部加厚（t = 18 mm，中部腹板为14 mm），突变处采用R = 200 mm的圆弧过渡，减小应力集中；所有横向加强肋与上翼缘接触的端面均要求刨平顶紧并焊接，也是为了保证轮压力的良好传递。与下翼缘则不焊，以减少疲劳的敏感性。

图6.4-20　18 m焊接工字形吊车梁结构

（钢材Q345－B，焊条E5015～E4313型；加劲肋末端处采用连续回焊，不得有起灭弧点）

(3) 焊接箱形吊车梁

对中重型厂房的大吨位重级工作制吊车梁要求在竖向载荷和水平载荷作用下都有很好的刚度，而且在扭矩作用下也能很好地工作。这时单腹板的工字形吊车梁已不能满足要求，一般都设计成双腹板的箱形吊车梁。

1）设计要点

① 设计计算的一般程序　箱形吊车梁设计计算的程序和工字形吊车梁是大同小异。首先是荷载和内力的计算，然后按内力初步选定截面尺寸，最后对所定截面进行下列验算：强度设计、挠度计算、整体稳定验算、腹板局部稳定验算、刚性横隔板计算、上翼缘板局部稳定计算、疲劳验算和端支座加劲肋计算等。

② 选定截面类型　箱形吊车梁按截面类型可分为窄箱形梁与宽箱形梁两类（图6.4-21）。前者为两块腹板共同承受一条吊车轨道的荷重，适用于轮压很大的特重级吊车梁或悬臂吊车梁等；后者为两块腹板各自分别承受一条吊车轨道的荷重（中列吊车梁），或两块腹板各自分别承受一条吊车轨道及屋盖（或墙架支柱）传来的荷重（边列吊车梁）。后面主要介绍简支宽箱形梁的设计计算。

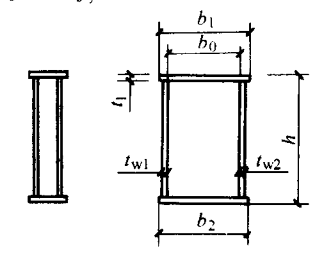
③ 箱形梁的截面尺寸及构造设计

（a）箱形梁的高度h可参照工字形梁高度初步确定，一般为$\left(\frac{1}{10}\sim\frac{1}{14}\right)l$，$l$为梁跨度。宽箱形梁的腹板中距$b_0$一般可取（0.6～0.8）$h$或为中列柱两侧的吊车轨距。当其截面尺



9

寸满足$\frac{h}{b_0}\leqslant 6$且$\frac{l}{b_0}\leqslant 95\frac{235}{f_y}$时可不计算梁的整体稳定性。



(a) 窄箱形吊车梁 (b) 宽箱形吊车梁

图6.4-21 箱形吊车梁的截面形式

(b) 梁的截面宜采用较薄板件，腹板一般可选用8～14 mm，翼缘板可选用12～20 mm。上翼缘板应外伸180～220 mm，以固定轨道连接用，但不应大于$15t_1\sqrt{\frac{235}{f_y}}$；下翼缘板应外伸60～80 mm，以便采用自动焊焊接。

(c) 梁腹板高厚比h_0/t_w不应大于$250\sqrt{\frac{235}{f_y}}$。当两侧竖向载荷相差较大时，腹板可采用两种厚度。当梁的高度及跨度较大时，宜做成端部变高度的变截面梁。端部变高后的高度应按抗剪计算确定并不宜小于$0.5h$，其变化形式可为在靠近梁端部阶形突变式，也可为在梁端沿梁全长的$\frac{l}{b}$范围内渐变式（图6.4-22）。其他各类构造要求可参照焊接工字形梁有关要求进行。

(d) 箱形梁的腹板与上盖板的连接应采用自动焊，并要求焊透的T形焊缝连接，其质量应不低于二级焊缝标准。腹板与下盖板的连接一般采用自动焊的单面剖口焊，并在背面（箱内）用焊条电弧焊补焊根，其焊接质量应满足二级焊缝标准。

(e) 根据端支座处的抗扭要求，箱形梁梁端一般均设计成平板支座（十字形端加劲肋）构造。

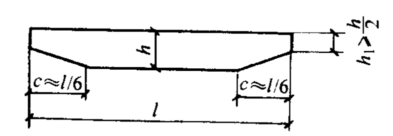


图6.4-22 变高度箱形吊车梁外形示意图

④ 抗扭及刚性横隔的设置

(a) 箱形梁的端部应设置端支撑以可靠防止梁截面扭转，沿梁的长度方向则应设置若干刚性横隔来保证梁抗扭刚度，其间距约为$\frac{l}{10}$，并应与腹板横向加劲肋的间距相协调。横隔可由T形钢或沿中间孔洞镶边的钢板或用角钢与肋板制成（见图6.4-23）。刚性横隔与上翼缘板和腹板可用焊接；与下翼缘板为避免疲劳敏感宜采用高强度螺栓连接。

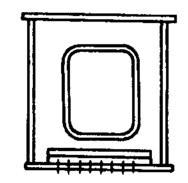
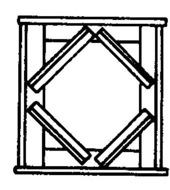



图6.4-23 箱形吊车梁的刚性横隔

(b) 刚性横隔截面的惯性矩I_d应分别满足下列公式的要求。

$$I_d\geqslant\frac{1}{500}I_x \tag{6.4-42}$$

$$I_d\geqslant\frac{1\,000\;Pb_0^2}{96E}\left(1+\frac{h}{b_0}\right) \tag{6.4-43}$$

式中，I_x为箱形吊车梁跨中截面对x轴的毛截面惯性矩；P为吊车最大轮压标准值（并不计动力系数）；h为梁的总高度；b_0为梁两腹板间的宽度；E为钢材的弹性模量。

⑤ 上翼缘纵向加劲肋的设置　按局部稳定要求，箱形梁的受压上翼缘下表面应沿盖板全长设置一道或多道纵向加劲肋，以使其所等分划出的盖板区格宽度$b_{01}\leqslant 40\;t_1\sqrt{\frac{235}{f_y}}$，此时$b_{01}$取为腹板与纵向加劲肋或两行纵向加劲肋间的距离。每一道纵向加劲肋对自身与上翼缘板相连边线为轴的惯性矩I_z应满足下列要求。

$$\left.\begin{aligned}&\text{设一道纵向加劲肋时}\ I_z\geqslant 0.12\;\gamma_1 b_0 t_1^3\\&\text{设二道纵向加劲肋时}\ I_z\geqslant 0.12\;\gamma_2 b_0 t_1^3\\&\text{设三道纵向加劲肋时}\ I_z\geqslant 0.12\;\gamma_3 b_0 t_1^3\end{aligned}\right\} \tag{6.4-44}$$

式中，b_0为梁两腹板间上翼缘板的宽度；t_1为上翼缘板厚度；γ_1、γ_2、γ_3为系数，按表6.4-18采用；计算γ_1、γ_2、γ_3时需先假定一道纵向加强肋的截面积A_z，一般可初选$A_z=0.1b_0t_1$进行试算后，最终选定纵向加劲肋截面面积A_z。

⑥ 腹板加劲肋的设置　箱形梁除设置抗扭横隔外，尚应在腹板内侧的横隔之间设置单侧横向加劲肋。当$\frac{h_0}{t_w}>170\times\sqrt{\frac{235}{f}}$时应在腹板外侧设置纵向加劲肋。腹板的局部稳定计算可按焊接工字形吊车梁的有关要求进行。加劲肋按构造设置时应与箱内刚性横隔布置相适应。

2) 结构实例　图6.4-24为30 m箱形吊车梁的焊接结构图。该吊车梁有下列特点。

① 为中列箱形吊车梁，两腹板各自承受一条吊车轨道的荷重。由于两侧吊车起重量不同，所以两块腹板厚度分别为12 mm和14 mm，端部腹板为渐变式，故分别加厚为16 mm和18 mm。

② 为了保证抗扭刚度，沿梁长按一定距离设置横隔。每一块横隔中部都开有镶边的矩形孔，既是工艺所需，也是为了减轻结构质量。横隔板与上翼缘用焊接连接，与下翼缘则不焊。但每隔一块横隔的下面都与下翼缘用螺栓连接，以提高抗扭性能和下翼缘的稳定性。

③ 为了保证上翼缘的局部稳定而用两根工字形截面的纵向加劲肋进行加强。

④ 腹板相对较薄，为了保证腹板的局部稳定性，在两腹板上部受压区的外侧分别用一根槽钢作纵向加劲肋进行加强，并在上翼缘与该纵向加劲肋之间用短的横向加劲肋加强。在每块腹板内侧两横隔之间又用长的横向加劲肋加强。

⑤ 梁端部由于构造需要，其高度已减小。故采用双箱形结构，以承受较大支反力及增强局部刚性。

1.4.2 通用桥式起重机焊接箱形梁

(1) 起重机简介

起重机分桥式起重机和臂架式旋转起重机两大类。桥式起重机中起重量在5 t以下的一般由电葫芦或链轮小车和一段工字梁或桁架组成。5 t以上采用电动双梁或单梁桥式起重机。

起重机工作性能由下列参数表示：起重量Q、跨度L、起升高度H、轨距B、辐度R、各机构工作速度v、工作级别A和轮压P等，它们是设计起重机的依据。有些参数，如工作速度、工作级别与焊接制造密切相关。

表 6.4-18 系数 γ_1、γ_2、γ_3

$\beta=\frac{A_z}{b_0 t_1}$	γ	a/b_0									
		0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
0.05	γ_1	2.72	5.14	8.13	11.61	15.48	19.60	23.83	28.02	30.20	30.20
	γ_2	5.10	9.27	14.55	20.89	28.22	36.45	45.48	55.21	64.86	—
	γ_3	7.49	13.48	21.10	30.34	41.13	53.42	67.12	82.17	—	—
0.10	γ_1	3.05	5.73	9.05	12.94	17.28	21.96	26.82	31.71	36.44	36.69
	γ_2	5.85	10.60	16.62	23.88	32.28	41.75	52.20	63.50	74.89	—
	γ_3	8.82	15.83	24.79	35.65	48.35	62.85	79.06	96.90	—	—
0.15	γ_1	3.38	6.32	9.97	14.26	19.09	24.32	29.80	35.39	40.89	43.83
	γ_2	6.60	11.92	18.70	26.86	36.34	47.06	58.91	71.79	84.92	—
	γ_3	10.15	18.19	28.47	40.95	55.57	72.28	90.99	111.64	—	—
0.20	γ_1	3.72	6.91	10.89	15.59	20.89	26.67	32.79	39.08	45.35	51.42
	γ_2	7.34	13.25	20.77	29.85	40.41	52.36	65.63	80.08	94.95	—
	γ_3	11.47	20.55	32.16	46.26	62.79	81.71	102.93	126.37	—	—

注：a 为箱形梁内刚性横隔间距；$\beta \leqslant 0.2$。

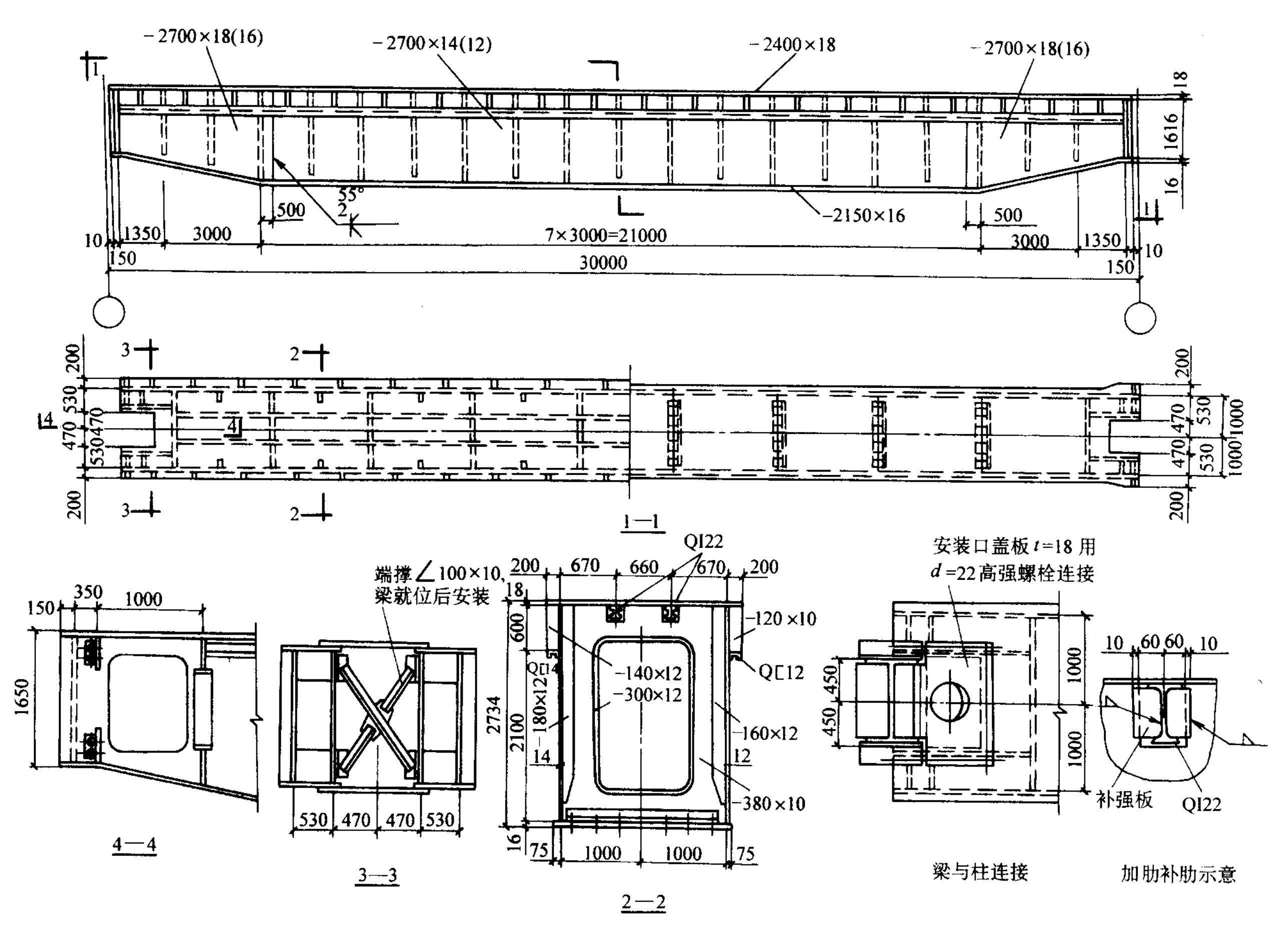


图 6.4-24 30 m 箱形吊车梁的焊接结构

设计起重机时要考虑它的工作级别，因为它反映了起重机在设计寿命期内使用时间的长短和负载的繁重程度。一般根据起重机的利用等级和载荷状态分轻、中、重、特重四个级别。很少起升到额定载荷的属轻级，有时起升额定载荷的



为中级，经常起升额定载荷属重级，频繁起升额定载荷的为特重级。

起重机主要受力构件所用的金属材料，一般是采用普通碳素结构钢 Q235A、Q235B 和低合金高强度钢 Q345A（16Mn）、Q390A（15MnV）等。在 -20℃以上工作的起重机（除冶金等特殊用途的起重机外）的主要承载构件允许用平炉和氧气顶吹转炉钢 Q235F，特重级起重机要采用特种平炉钢 Q235B 或 Q345B。

起重机的设计与计算应符合《起重机设计规范》（GBJ/T 3811—1983）的规定。设计内容除要进行保证其基本性能和运动学的计算外，还要进行承载能力和抗倾覆稳定性的计算。承载能力包括寿命、抗塑性破坏（或脆性断裂）及结构稳定性。由于统计资料不足，当前承载能力计算方法普遍使用的仍是许用应力法。

对起重机金属结构部分应进行强度、刚度、稳定性以及寿命（疲劳强度）计算。

强度计算按材料力学的一般强度计算公式进行，其计算应力应小于许用应力；稳定性包括整体稳定性和局部稳定性，对轴心受压构件、双向或单向压弯构件、板和圆柱壳等均应进行稳定性计算；对工作级别是 A6 ~ A8 级的起重机结构件，应验算其疲劳强度。可以使用应力比法和应力幅法，见本篇第 3 章 5.2.2 和 5.2.3。

起重机的结构刚度分静态刚度和动态刚度。静态刚度是指在规定载荷作用于指定位置时，结构在某一位置处的静态弹性变形值。对于桥式起重机，当满载小车位于跨中，主梁由于额定起升载荷和小车自重在跨中引起的垂直静挠度 Y_L 应满足下列要求：（L 为起重机跨度）

A5 或 A6 以下工作级别的起重机 $Y_L \leqslant L/700$；

A6 工作级别的起重机 $Y_L \leqslant L/800$；

A7、A8 工作级别的起重机 $Y_L \leqslant L/1\,000$。

桥架是桥式起重机的主要承载结构，一般由主梁和端梁组成。主梁有单根的和双根的，图 6.4-25 示出的是双主梁起重机桥架结构简图。

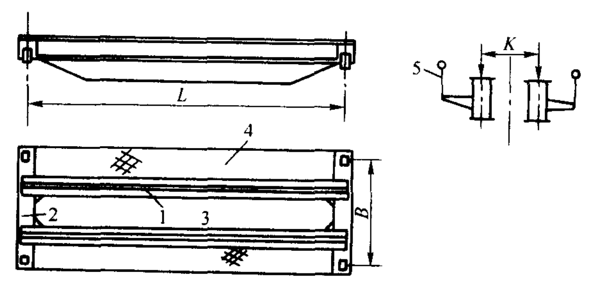


图 6.4-25　通用桥式双梁起重机桥架结构简图

1—主梁；2—端梁；3—轨道；4—走台；5—栏杆

双梁桥架有各种结构形式，表 6.4-19 列出了它们的截面形状及其特点。表中正轨箱形双梁是桥式起重机中应用最广泛又具有典型性的桥架形式。

设计桥架主梁时，一般须进行强度、刚度和稳定性计算。强度计算主要考虑它的最大弯矩截面处的正应力；跨端最大剪应力处腹板的剪应力；上翼缘板局部弯曲应力；对 A6 ~ A8 工作级别的主要承重构件关键部位的疲劳强度。对主梁刚度计算，其垂直静挠度 Y_L 应满足前述的要求。对这种桥架的主梁一般不需进行整体稳定性计算，因为箱形主梁具有较大的水平刚性和抗扭刚性，连接在主梁侧面的走台对箱形主梁的水平刚性也有加强作用，因此一般不会发生整体失稳。但对主梁的腹板和翼缘板的局部稳定性需要进行验算。为了减小主梁在使用中由于下挠造成小车运行的爬坡阻力，在制造主梁时需做成上拱形状，主梁跨中预制的理论拱度值为 $L/1\,000$，它向两边均匀地按抛物线变化。但实际下料时还要考虑补偿自重引起的挠曲变形和焊接变形等。

表 6.4-19　桥架结构形式及特点

分类	图　示	特　点
正轨箱形双梁		将小车轨道放置于箱形梁上翼缘板中心线上，具有零部件数量少，制造工艺简单，通用性强等优点，应用最为广泛
偏轨箱形双梁		小车轨道设置于主腹板顶上，梁内可省去小加劲板。为承托轨道，腹板外常设三角加劲板。主梁采用宽形梁可省去走台，简化了制造、运输和安装
半偏轨箱形双梁	≈a/4 a	小车轨道设置于主梁中心线和主腹板之间的上翼缘板上（轨道距梁中心线约 1/4 翼缘板宽度），可省去腹板外侧的三角加劲板，所受扭矩比偏轨箱形梁小。可使焊接工艺得到改善，减少焊接变形
偏轨空腹箱形双梁		在偏轨箱形梁没有轨道的副腹板上开设许多带镶边的矩形孔洞，可减轻自重，取消走台，又能使梁内通风散热，为梁内放置运行机构和电气设备提供了有利条件。但制造比较复杂，常用于大起重量起重机
偏轨箱形单主梁	(a) (b)	垂直反滚轮单主梁［见图（a）］，制造工艺同偏轨箱形梁一样，使用维修方便，但小车垂直轮压较大，适用于小起重量起重机 水平反滚轮单主梁［见图（b）］，适用于大起重量起重机，但吊钩一侧的水平滚轮不便于维修和更换。采用单主梁形式可减轻桥架自重，但起重小车的结构比较复杂，故应用不多
四桁架结构		主梁由主桁架、辅助桁架，上水平桁架和下水平桁架构成。横截面设置斜支承以保持空间结构几何不变。这种形式自重轻，刚性好但制造复杂，外形尺寸大，疲劳强度低，一般只用于大跨度起重机

图 6.4-26 所示为桥式起重机正轨箱形梁（主梁）的外形与截面结构。

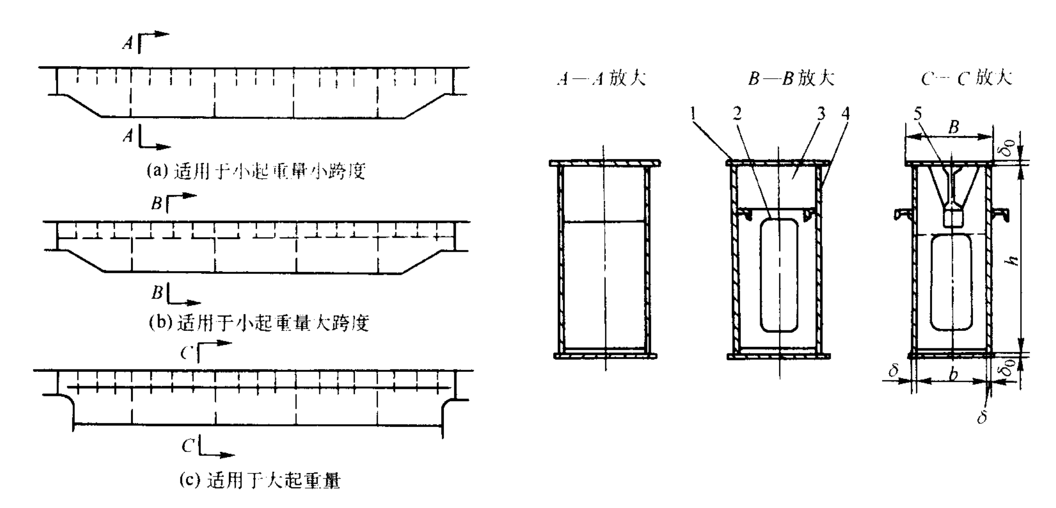


图 6.4-26　正轨箱形梁的外形与截面

1—上翼缘板；2—大加劲板；3—小加劲板；4—腹板；5—承轨梁

它的截面尺寸一般取为：

主梁高度 $h=$（1/8～1/4）L，小跨度、大起重量时取大值，反之则取小值。

腹板间距 $b\geqslant$（1/60～1/50）L，并且 $b\geqslant 300$ mm，便于进行焊接。

上翼板宽度　$B=b+2\delta+40$

上翼板厚度（δ_0）由局部稳定条件决定，一般取

$$\delta_0=\frac{b}{50}\sqrt{\frac{\sigma_s}{240}}\qquad(6.4\text{-}45)$$

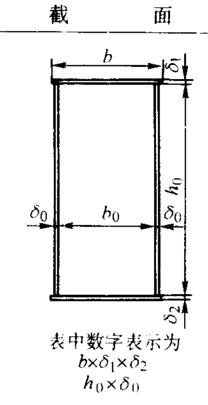
腹板厚度（δ）通常随起重量增大而加厚，考虑到制造工艺、运输和锈蚀的影响，$\delta\geqslant 6$ mm。

（2）正轨箱形梁实例

实际应用的桥式起重机正轨箱形梁（主梁）结构基本定型，并形成系列。专业生产厂家一般都根据起重机的跨度、起重量和工作级别等设计出一系列足以保证强度、刚度和稳定性的主梁截面尺寸。例如，表 6.4-20 所列资料就是我国大连起重机厂生产通用桥式起重机系列产品的主梁截面尺寸。

表 6.4-20　通用桥式起重机系列主梁截面尺寸　　mm

截　　面



跨度 /m	起重量 /t											
	5	10	15/3		20/5		30/5		50/10		75/20	100/20
	中、重级	中、重级	中级	重级	中级	重级	中级	重级	中级	重级	中级	中级
10.5	300×8×6 600×6	350×8×6 600×6	400×10×10 750×6	400×10×10 750×6	400×12×10 750×6	400×12×10 750×6	450×12×10 850×6	450×12×10 850×6	450×16×16 835×6	450×16×16 835×6	—	—
13.5	350×8×6 750×6	400×8×6 750×6	400×10×10 750×6	400×12×10 850×6	400×12×12 750×6	450×14×14 750×6	450×14×14 850×6	450×16×16 850×6	450×16×16 1 000×6	450×18×18 1 000×6	700×8×8 1 550×8	800×10×8 1 700×8
16.5	400×8×6 850×6	450×8×6 850×6	450×10×10 850×6	450×12×10 850×6	450×12×12 850×6	450×14×14 850×6	500×14×14 1 000×6	500×16×16 1 000×6	500×22×22 1 000×6	500×21×21 1 000×6	800×8×8 1 700×8	800×12×10 1 700×8
19.5	450×8×6 1 000×6	500×8×6 1 000×6	500×10×10 1 000×6	500×12×10 1 000×6	500×12×12 1 000×6	500×14×14 1 000×6	550×14×14 1 150×6	550×16×16 1 150×6	550×22×22 1 150×6	550×24×24 1 150×6	800×12×12 1 700×8	800×14×14 1 700×8
22.5	500×8×6 1 150×6	550×8×6 1 150×6	550×10×8 1 150×6	550×10×10 1 150×6	550×12×10 1 150×6	550×14×12 1 150×6	550×14×14 1 300×6	550×16×16 1 300×6	550×22×22 1 300×6	550×24×24 1 300×6	800×14×14 1 700×8	800×18×18 2 000×8
25.5	550×8×6 1 300×6	550×8×8 1 300×6	550×10×8 1 300×6	600×10×10 1 300×6	550×12×10 1 300×6	550×14×12 1 300×6	600×14×14 1 450×6	600×16×16 1 450×6	600×22×22 1 450×6	600×24×24 1 450×6	800×14×14 2 000×8	800×20×18 2 000×8
28.5	600×8×6 1 450×6	600×8×8 1 450×6	600×10×8 1 450×6	600×10×10 1 450×6	600×12×10 1 450×6	600×14×12 1 450×6	600×14×14 1 600×6	600×16×16 1 600×6	600×22×22 1 600×6	600×24×24 1 600×6	800×16×16 2 000×8	800×22×20 2 000×8
31.5	600×8×6 1 600×6	600×8×8 1 600×6	600×10×8 1 600×6	600×10×10 1 600×6	600×12×10 1 600×6	650×14×12 1 600×6	650×14×14 1 700×6	650×16×16 1 700×6	650×22×22 1 700×6	650×24×24 1 700×6	800×18×18 2 000×8	800×24×24 2 000×8

注：表列尺寸为大连起重机厂 1973 年通用桥式起重机系列产品的主梁截面尺寸。

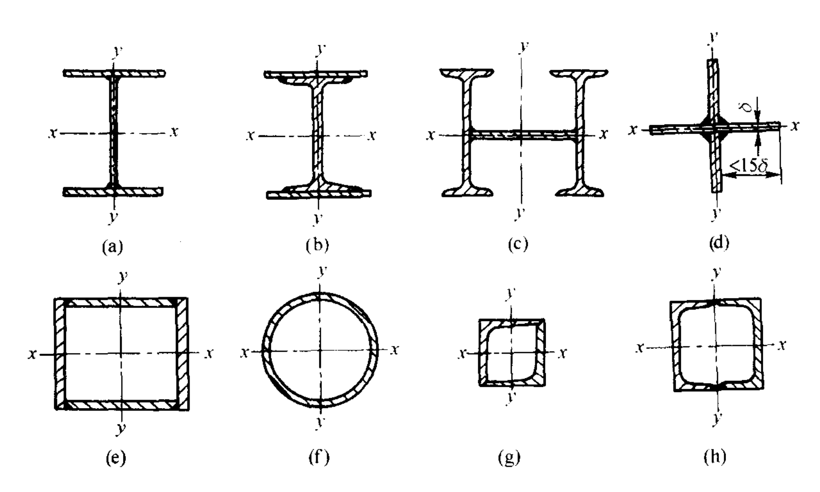


图 6.4-27　轴心受压实腹柱的截面形式

2　焊接柱

2.1　柱的类型及其截面形式

柱是主要承受压力的构件，常用来支承梁和桁架等构件或结构，并将载荷传递到基础。

柱按受力特点分为轴心受压柱（轴心受压构件）和偏心受压柱（压弯构件）。工作平台柱和桁架、塔架、网架结构中的压杆多为轴心受压构件；厂房和高层建筑的框架柱，具有节间载荷的桁架上弦杆，门式起重机的门架支柱等多为压弯构件。

按截面形式分为实腹柱和格构柱两类。

（1）实腹柱

实腹柱的柱身由整体截面组成。用型钢焊成的实腹柱焊接量少，应优先选用；用钢板焊成的实腹柱适应性强，可按使用要求进行设计。

图 6.4-27 是轴心受压实腹柱常用的截面形式。钢板焊接的工字形截面（见图 6.4-27a）可做成双轴对称形式，达到最佳截面特性，且截面组合灵活、分布合理，是柱的主要截面形式。大型柱可采用型钢和钢板组焊成的工字形或 H 形截面（见图 6.4-27b、c）。十字形截面（见图 6.4-27d）易于实现等稳定要求，且截面相同时比工字形截面的刚性大。箱形或圆形截面（见图 6.4-27e、f）两个方向的回转半径可以接近或相等，承载能力高，抗扭刚度大。由型钢组成的封闭截面（见图 6.4-27g、h）结构紧凑、刚度较大，但内部涂漆较困难。

承受弯矩较大的压弯实腹柱，可用钢板和型钢制成单轴对称的截面形式（图 6.4-28），将压力较大侧的截面加大。

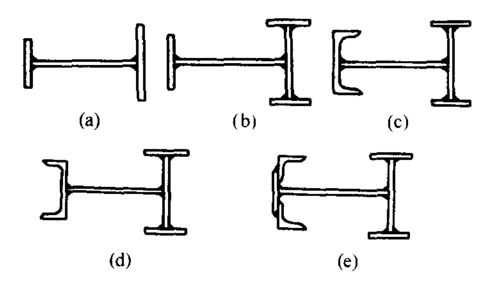


图 6.4-28　压弯实腹柱的截面形式

（2）格构柱

格构柱由肢件和缀件－缀板或缀条组成（图 6.4-29），质量小、省材料，风的阻力小，但制造较费工。缀板式格构柱外形整齐，焊接较方便，但承载能力较缀条式的低，适用于载荷不大的柱。

肢件多采用槽钢或工字钢，有时采用角钢或圆管（见图 6.4-29c）。槽钢肢件翼缘向内时，柱的外形平整、刚度大，且缀件宽度较小，应用较普遍；承载较大的柱可用工字钢作柱肢；承载较小而长细比大的柱宜采用四个角钢作柱肢；用钢管作柱肢宜采用三肢结构，其承载能力高且经济。

缀件的作用是保证各个肢件共同工作。缀板一般采用钢板（见图 6.4-29a），其宽度 $b \geqslant 2a/3$，厚度 $\delta \geqslant a/40$ 且不小于6 mm（a 为分肢轴线间距），与肢件搭接长度一般为 20 ~ 30 mm，缀板边缘到柱边距离可取 15 ~ 20 mm。

缀条常用单角钢，大型柱可用槽钢（见图 6.4-29b），一般布置在柱肢的两侧平面内，并沿柱高呈三角形分布，其轴线与柱肢轴线宜汇交于一点。水平缀条主要用来减小单肢的计算长度，它与斜缀条的交角一般取 40° ~ 50°；无水平缀条时，两个斜缀条的交角一般采用 60° ~ 90°。

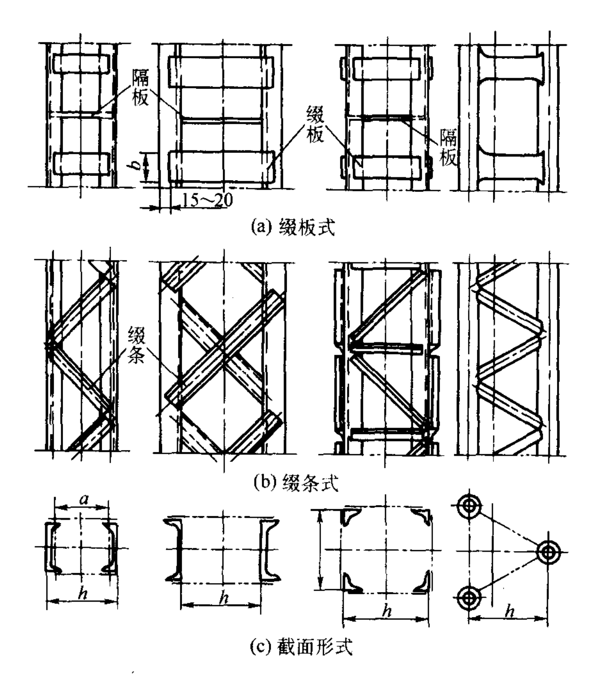


图 6.4-29　焊接格构柱

图 6.4-30 是偏心受压格构柱常用截面形式。弯矩较小时可采用双轴对称截面（图 6.4-30a、b、c）；弯矩较大时常采用单轴对称截面，将截面较大的肢件置于压应力较大侧（图 6.4-30b、e）。

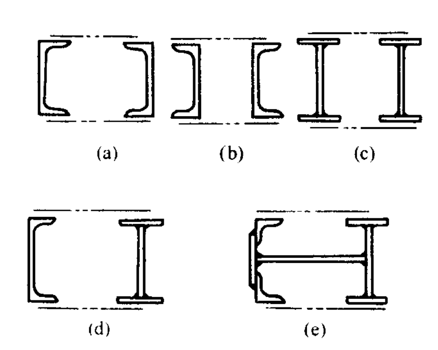


图 6.4-30　偏心受压格构柱的截面形式

2.2　焊接柱的设计与计算

设计焊接柱时，首先应根据其工作条件选择合理的截面形式，根据强度、稳定和刚度条件确定截面的各部分尺寸，最后对柱的强度、刚度和稳定性进行验算。本节按《钢结构设计规范》（GB 50017—2003）的有关原则介绍焊接柱的设计计算方法。

2.2.1　焊接柱的刚度控制

（1）柱和受压构件的允许长细比

焊接柱和受压构件的刚度由长细比按下式控制：

$$\lambda = [\lambda]$$

式中，$\lambda=\frac{l_0}{i}$为构件的长细比，对格构式受压构件，λ 应由按表 6.4-30 算出的换算长细比代替；l_0 为压杆计算长度，按下一款的有关规定确定；i 为截面的回转半径；$[\lambda]$ 为压杆的容许长细比，按表 6.4-21 的有关规定确定。

（2）柱和受压构件的计算长度

1）等截面压杆和单层或多层框架等截面柱在框架内的计算长度按式（6.4-46）确定：

$$l_0=\mu l \qquad (6.4\text{-}46)$$

式中，l 为压杆或柱的长度或高度；μ 为计算长度系数。对于压杆可按表 6.4-22 所列的相应边界约束条件查得，对于单层或多层框架柱可按表 6.4-23 查得。

2）单层厂房框架下端刚性固定的阶形柱，在框架平面内的计算长度，可按 GB 50017 相关条款的规定确定。

表 6.4-21　受压构件的容许长细比 $[\lambda]$

项次	构 件 名 称	$[\lambda]$
1	柱、桁架和天窗架构件	150
	柱的缀条、吊车梁或吊车桁架以下的柱间支撑	
2	支撑（吊车梁或吊车桁架以下的柱间支撑除外）	200
	用以减少受压构件长细比的杆件	

注：1. 桁架（包括空间桁架）的受压腹杆，当其内力等于或小于承载能力的 50%时，允许长细比值可取为 200。
2. 在圆钢、小角钢等构成的轻形钢桁架中的主要压杆（弦杆、端斜杆、端竖杆）的长细比不宜大于 150，其他压杆的长细比不宜大于 200。

3）框架柱沿房屋长度方向（在框架平面外）的计算长度应取阻止框架平面外位移的支承点（柱的支座、吊车梁、托架以及支撑和纵梁的固定节点等）之间的距离。

4）确定桁架弦杆和单系腹杆的长细比时，其计算长度 l_0 应按表 6.4-24 采用。

当桁架弦杆侧向支承点之间的距离为节间长度的若干倍（图 6.4-31），且各节间弦杆轴心压力有变化时，该弦杆在桁架平面外的计算长度，应按表 6.4-23 的有关规定确定。

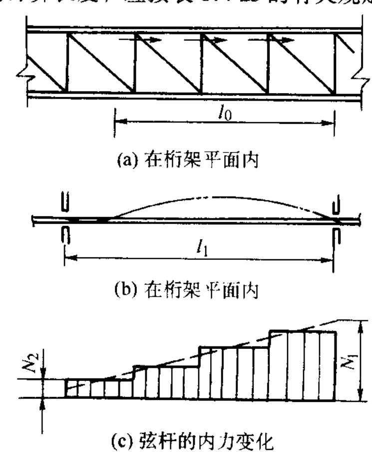
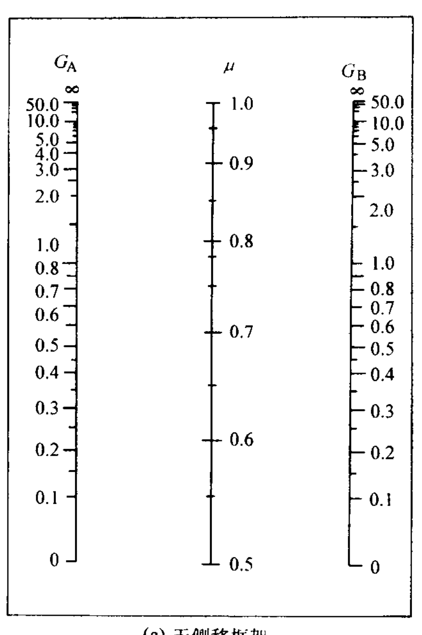


图 6.4-31　弦杆轴心压力在侧向支承点间有变化的桁架简图

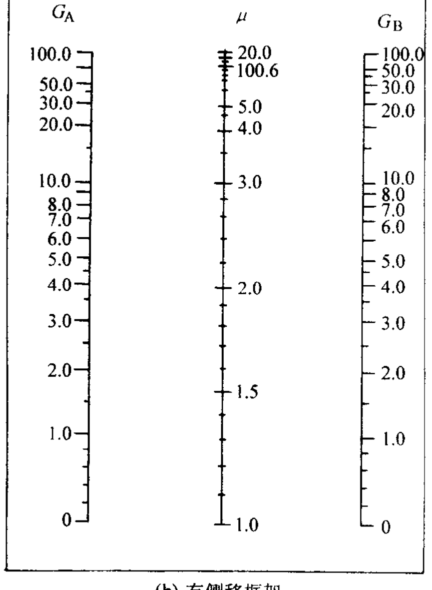
表 6.4-22　等截面压杆的计算长度系数 μ

项　次	1	2	3	4	5	6
虚线所示为杆件屈曲形状	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
理论值 μ	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
当接近理想条件时的设计建议值 μ	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
		不能转动			不能平移	
		自由转动			不能平移	
		不能转动			自由平移	
		自由转动			自由平移	

表 6.4-23 单层或多层框架等截面柱的计算长度系数 μ



(a) 天侧移框架



(b) 有侧移框架

注：1. 表中的 G_A、G_B 分别为相交于柱上端、柱下端的柱线刚度之和与横梁线刚度之和的比值。对任何给定的柱子，只要知道两端的 G 值（G_A、G_B），就可通过 $G_A G_B$ 连线与中心线的交点，求得 μ 值。

2. 当横梁与柱铰接时，取横梁线刚度为零。
3. 对底层框架柱：当柱与基础铰接时，取 $G_B=\infty$；当柱与基础刚接时，取 $G_B=0$。
4. 无侧移框架系指框架中设有支撑架、剪力墙、电梯井等支撑结构，且其抗侧移刚度等于或大于框架本身抗侧移刚度的5倍者。
5. 有侧移框架系指框架中未设上述支撑结构，或支撑结构的抗侧移刚度小于框架本身抗侧移刚度的5倍者。
6. 该 μ 值也可根据 GB 50017 相关条款确定。

表 6.4-24 桁架弦杆和单系腹杆的计算长度 l_0

项　　次	弯 曲 方 向	弦　　杆	腹　　杆	
			支座斜杆和支座竖杆	其他腹杆
1	在桁架平面内	l	l	$0.8l$
2	在桁架平面外	l_1	l	l
3	斜平面	—	l	$0.9l$

注：1. l 为构件的几何长度（节点中心间距离）；l_1 为桁架弦杆侧向支承点之间的距离。

2. 斜平面系指与桁架平面斜交的平面，适用于构件截面两主轴均不在桁架平面内的单角钢腹杆和双角钢十字形截面腹杆。
3. 无节点板的腹杆计算长度在任意平面内均取其等于几何长度。

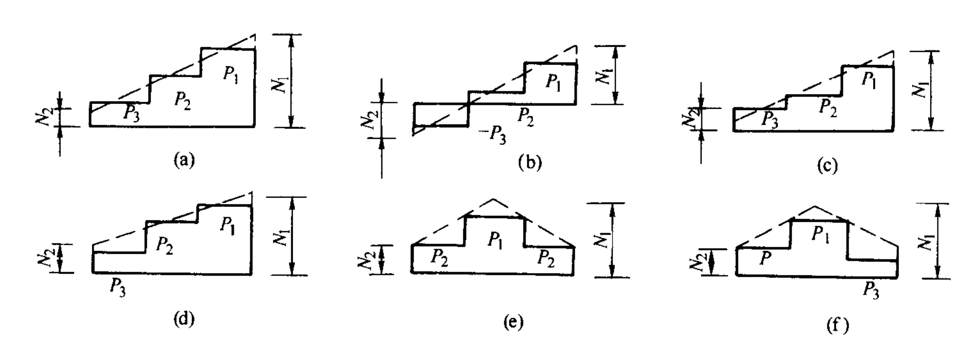


图 6.4-32 弦杆中的 N_1、N_2 的确定方法

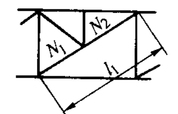
(a)～(f) 图中的 P_1、P_2、P_3 为弦杆中的实际内力

表 6.4-25 弦杆轴心压力在侧向支承点间有变化时的出平面计算长度

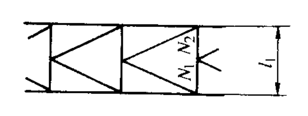
项次	弦杆内力变化形式	弦杆出平面计算长度公式
1	N_2, N_1, $\Delta N=(N_1-N_2)$, l_1	$l_0=l_1\left(0.75+0.25\dfrac{N_1}{N_2}\right)$ (6.4-47) 且 $l_0\geqslant 0.5l_1$
2	N_2, N_1, l_1	$l_0=l_1\sqrt{\dfrac{1+0.88N_2/N_1}{1.88}}$ (6.4-48) 且 $l_0\geqslant 0.66\ l_1$
3	N_2, N_1, l_1	$l_0=l_1\sqrt{\dfrac{1+2.18N_2/N_1}{3.18}}$ (6.4-49) 且 $l_0\geqslant 0.42l_1$
4	N_2, N_1, l_1, 抛物线	$l_0=l_1\sqrt{\dfrac{1+1.09N_2/N_1}{2.09}}$ (6.4-50) 且 $l_0\geqslant 0.62l_1$

注：N_1 为在侧向支承点间的弦杆中最大的计算压力，按图 6.4-32 所示方法由实际弦杆内力分布图确定，计算时取正值；N_2 为在侧向支承点间的弦杆中最小的计算压力或拉力，按图 6.4-32 确定，计算时压力取正值，拉力取负值；l_1 为侧向支承点间距。

桁架再分式腹杆体系的受压主斜杆及 K 形腹杆体系的竖杆等（图 6.4-33），在桁架平面外的计算长度也应按式(6.4-47) 确定（受拉主斜杆仍取 l_1）；在桁架平面内的计算长度则取节点中心间距离。



(a) 再分式腹杆系的受压主斜杆



(b) K 形腹杆体系的竖杆

图 6.4-33 受压腹杆压力有变化的桁架简图

5）确定桁架交叉腹杆的长细比时，在桁架平面内的计算长度应取节点中心到交叉点间的距离；在桁架平面外的计算长度应按表 6.4-26 的规定采用。

表 6.4-26 桁架交叉腹杆在平面外的计算长度

项次	杆件类别	交叉腹杆情况	平面外计算长度
1	压杆	当相交的另一杆受拉，且两杆在交叉点均不中断	$0.5l$
2		当相交的另一杆受拉，两杆中有一杆在交叉点中断并以节点板搭接	$0.7l$
3		其他情况	l
4	拉杆	—	l

注：1. l 为节点中心间距离（交叉点不作为节点考虑）。
2. 当两交叉杆均受压时，不宜有一杆中断。
3. 当确定交叉腹杆中单角钢压杆斜平面内的长细比时，计算长度应取节点中心至交叉点的距离。

2.2.2 轴心受压构件的设计和计算

（1）实腹式轴心受压构件的计算 实腹式轴心受压构件，应按表 6.4-27 所列公式进行计算。

表 6.4-27 实腹式轴心受压构件计算公式

项次	计算内容			计算公式	备注
1	强度			$\sigma=\dfrac{N}{A_n}\leqslant f$ (6.4-51)	
2	整体稳定性			$\dfrac{N}{\varphi A}\leqslant f$ (6.4-52)	
3	局部稳定性	翼缘	工字形及 T 形截面	$\dfrac{b}{t}\leqslant(10+0.1\lambda)\sqrt{\dfrac{235}{f_y}}$ (6.4-53) 当 $\lambda<30$ 时，取 $\lambda=30$；当 $\lambda>100$ 时，取 $\lambda=100$	
			箱形截面	与表 6.4-18 的规定相同	

续表 6.4-27

项次	计算内容			计算公式	备注
3	局部稳定性	腹板	工字形截面	$\frac{h_0}{t_w} \leqslant (25+0.5\lambda)\sqrt{\frac{235}{f_y}}$ (6.4-54) 当 $\lambda<30$ 时，取 $\lambda=30$；当 $\lambda>100$ 时，取 $\lambda=100$	当工字形和箱形截面的 h_0/t_w 不满足要求时，可用纵向加强肋加强使之满足要求，或在计算构件的强度和稳定性时，将腹板的截面仅考虑计算高度边缘范围内两侧宽度各 $20t_w\times\sqrt{235/f_y}$ 的部分（计算构件的稳定系数时，仍用全部截面）见图 6.4-34
			T形截面	按式（6.4-53）计算	
			箱形截面	$\frac{h_0}{t_w} \leqslant 40\sqrt{\frac{235}{f_y}}$ (6.4-55)	

注：N 为轴心压力；A_n、A 为分别为构件的净截面面积和毛截面面积；φ 为轴心受压构件的稳定系数，根据表 6.4-28 和图 6.4-35 的截面分类以及构件的最大长细比 λ，按式（6.4-56）或式（6.4-57）计算，或由 GB 50017—2003 查得；λ 为构件的长细比，取两个方向的较大值；b、t 为翼缘板的自由外伸宽度和厚度；h_0、t_w 为腹板的计算高度和厚度。

表 6.4-28 轴心受压构件的截面分类

截面形式和对应轴		类别
轧制，$b/h\leqslant0.8$，对 x 轴	轧制，对任意轴	a类
轧制，$b/h\leqslant0.8$，对 y 轴	轧制，$b/h>0.8$ 对 x、y 轴	b类
焊接，翼缘为焰切边，对 x、y 轴	焊接，翼缘为轧制或剪切边，对 x 轴	
轧制，对 x、y 轴	轧制，对 x、y 轴	
轧制（等边角钢），对 x、y 轴	焊接，对任意轴	
轧制或焊接，对 y 轴	轧制或焊接，对 x 轴	
焊接，对 x、y 轴		
格构式，对 x、y 轴		



续表 6.4-28

截面形式和对应轴				类别
(图)	焊接，翼缘为轧制或剪切边，对 y 轴	(图)	轧制或焊接，对 y 轴	c类
(图)	轧制或焊接，对 x 轴	无任何对称轴截面，对任意轴		
		板材厚度大于 40 mm 的焊接实腹截面，对任意轴		

注：当槽形截面用于格构式构件的分肢、计算分肢对垂直于腹板轴的稳定性时，应按 b 类截面考虑。

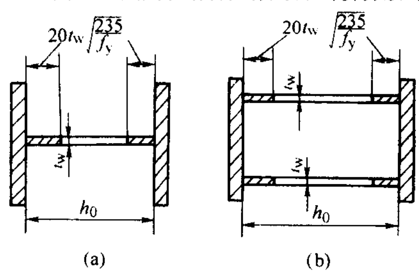


图 6.4-34 腹板局部失稳后的计算截面

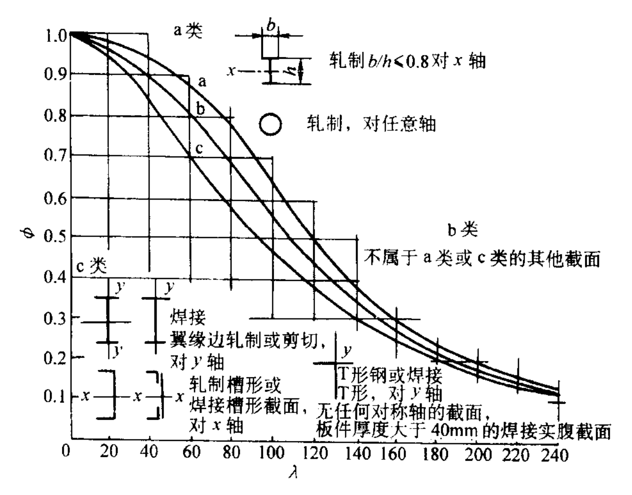


图 6.4-35 轴心受压构件的截面分类和稳定系数

当 $\bar{\lambda}=\frac{\lambda}{\pi}\sqrt{\frac{f_y}{E}}\leqslant 0.215$ 时，

$$\varphi=1-\alpha_1\bar{\lambda}^2 \tag{6.4-56}$$

当 $\bar{\lambda}>0.215$ 时，

$$\varphi=\frac{1}{2\bar{\lambda}^2}\left[\alpha_2+\alpha_3\bar{\lambda}+\bar{\lambda}^2-\sqrt{(\alpha_2+\alpha_3\bar{\lambda}+\bar{\lambda}^2)^2-4\bar{\lambda}^2}\right] \tag{6.4-57}$$

式中，α_1、α_2、α_3 为系数，根据表 6.4-28 的截面分类，按表 6.4-29 采用。

表 6.4-29 系数 α_1、α_2、α_3

截面类别		α_1	α_2	α_3
a类		0.41	0.986	0.152
b类		0.65	0.965	0.300
c类	$\bar{\lambda}\leqslant 1.05$	0.73	0.906	0.595
	$\bar{\lambda}>1.05$		1.216	0.302

(2) 格构式轴心受压构件的计算

1) 格构式轴心受压构件的缀件主要有缀条和缀板两类(图 6.4-36)。在格构式截面中，称通过缀件的轴为虚轴。格构式轴心受压构件的强度和整体稳定性计算公式同实腹式轴心受压构件，但在进行绕虚轴的整体稳定验算时，应按表 6.4-30 的换算长细比 λ_o 查 φ 值。

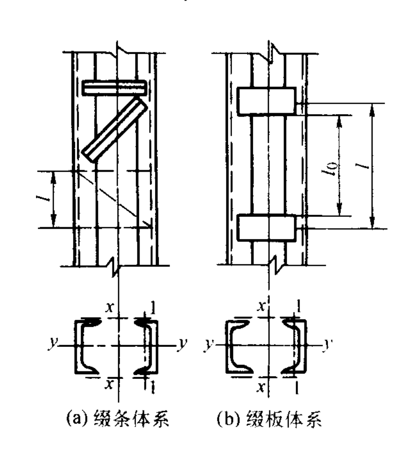


图 6.4-36 格构式轴心受压构件的缀件体系

2) 用填板连接而成的双角钢或双槽钢构件，可按实腹式构件进行计算，但填板间的距离 l_d 在受压杆中不应大于 $40i$；在受拉杆中不宜大于 $80i$。i 为单肢截面回转半径，对图 6.4-37a、b 所示截面，取一个角钢或槽钢与填板平行的形心轴的回转半径；对图 6.4-37c 所示的十字形截面，取一个角钢的最小回转半径。受压构件的两个侧向支承点之间的填板数不得少于两个。

3) 格构式轴心受压构件的分肢稳定性一般由构造措施保证。当缀件为缀条时，其分肢的长细比 λ_1 不应大于构件两个方向的长细比（对虚轴取换算长细比）的较大值 λ_{max} 的 0.7 倍；当缀件为缀板时，λ_1 不应大于 40，并不应大于 λ_{max} 的 0.5 倍（当 $\lambda_{max}<50$ 时，取 $\lambda_{max}=50$）。

4) 格构式轴心受压构件的缀件内力及截面应按表 6.4-31 的规定计算。

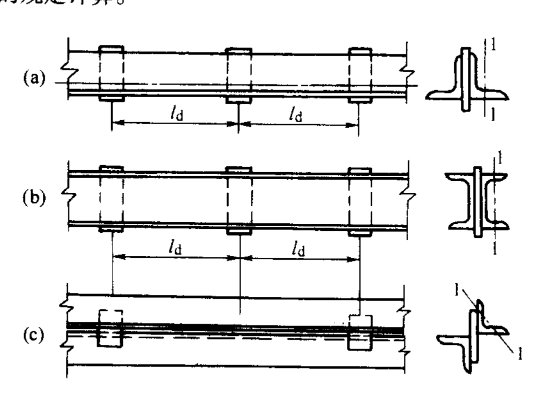


图 6.4-37 用填板连接成的双角钢和双槽钢截面



表 6.4-30　格构式构件的换算长细比 λ_0

项次	构件截面形式	缀件种类	计 算 公 式	备　注
1		缀板	$\lambda_{ox}=\sqrt{\lambda_x^2+\lambda_1^2}$　(6.4-58)	1）缀板柱中，同一截面处缀板（或型钢横杆）的线刚度之和不得小于柱较大分肢线刚度的 6 倍 2）斜缀条与构件轴线间的夹角应在 40°～70°范围内
2		缀条	$\lambda_{ox}=\sqrt{\lambda_x^2+27\dfrac{A}{A_{1x}}}$　(6.4-59)	
3		缀板	$\lambda_{ox}=\sqrt{\lambda_x^2+\lambda_1^2}$　(6.4-60) $\lambda_{oy}=\sqrt{\lambda_y^2+\lambda_1^2}$　(6.4-61)	
4		缀条	$\lambda_{ox}=\sqrt{\lambda_x^2+40\dfrac{A}{A_{1x}}}$　(6.4-62) $\lambda_{oy}=\sqrt{\lambda_y^2+40\dfrac{A}{A_{1y}}}$　(6.4-63)	
5		缀条	$\lambda_{ox}=\sqrt{\lambda_x^2+\dfrac{42A}{A_1(1.5-\cos^2\theta)}}$　(6.4-64) $\lambda_{oy}=\sqrt{\lambda_y^2+\dfrac{42A}{A_1\cos^2\theta}}$　(6.4-65)	

注：λ_x、λ_y 为整个构件对 x 轴和 y 轴的长细比；λ_1 为单肢对最小刚度轴 1-1 的长细比，见表 6.4-30 的表图。其计算长度取为相邻两缀板的净距离（图 6.4-36b）；A 为构件毛截面面积；A_{1x}、A_{1y} 为构件截面中垂直于 x 轴和 y 轴的平面内各斜缀条的毛截面面积之和；A_1 为构件截面中各斜缀条毛截面面积之和；θ 为构件截面内缀条所在平面与 x 轴的夹角。

表 6.4-31　缀件内力与截面计算

项　次	计 算 内 容	计 算 公 式	备　注
1	轴心受压构件的剪力	$V=\dfrac{Af}{85}\sqrt{\dfrac{f_y}{235}}$　(6.4-66)	沿构件全长均匀分布，且可在二个方向作用
2	斜缀条中的轴心	$N_1=\dfrac{V_1}{n\cos\alpha}$　(6.4-67)	见图 6.4-38
3	缀板所受的剪力和弯矩（和肢件连接处）	$T=\dfrac{V_1 l}{a}$　(6.4-68) $M=\dfrac{V_1 l}{2}$　(6.4-69)	见图 6.4-39
4	缀条截面验算	斜缀条按承受 N_1 的轴心受压构件计算，水平缀条通常采用与斜缀条相同的截面	应按表注 1 对强度设计值进行折减
5	缀板截面验算	缀板按承受剪力 T 和弯矩 M 的受弯构件计算	应按表注 2 对缀板提出构造要求

注：1. V 为整个截面所受剪力；V_1 为分配到一个缀材面的剪力，$V_1=\dfrac{V}{2}$；n 为承受剪力 V_1 的斜缀条数；α 为斜缀条与水平线的夹角（图 6.4-38）；T、M 为一块缀板所受的剪力和弯矩（和肢件连接处）；l 为缀板中心间的距离（图 6.4-39）；a 为肢件轴线间的距离。

2. 计算单面连接的单角钢杆件或连接时，钢材和焊缝的强度设计值应乘以相应的折减系数。

（1）按轴心受力计算强度和连接　0.85；

（2）按轴心受压计算稳定性

等边角钢	$0.6+0.0015\lambda$，但不大于 1.0；
短边相连的不等边角钢	$0.5+0.0025\lambda$，但不大于 1.0；
长边相连的不等边角钢	0.70；

λ 为长细比，对中间无联系的单角钢压杆，应按最小回转半径计算，当 $\lambda<20$ 时，取 $\lambda=20$。

3. 当缀板采用钢板时，其宽度 $c\geqslant\dfrac{2a}{3}$，厚度 $t\geqslant a/40$ 及 $\geqslant 6$ mm（图 6.4-39）。

(3) 轴心受压构件的设计步骤

1) 实腹式轴心受压构件的设计步骤列于表 6.4-32。在确定了钢材的标号、轴心压力的设计值、杆件的计算长度和截面形式之后，可按该表设计柱截面尺寸。

2) 双肢格构式轴心受压构件的设计步骤列于表 6.4-34。在确定了钢材种类、轴心压力的设计值、杆件的计算长度和截面形式之后，可按表设计柱截面尺寸。

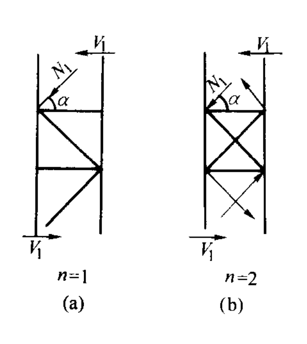


图 6.4-38　缀条计算简图

2.2.3　压弯构件的设计和计算

(1) 实腹式压弯构件的计算

实腹式压弯构件应按表 6.4-35 所列公式进行计算。

(2) 格构式压弯构件的计算

格构式压弯构件按表 6.4-36 所列公式进行计算。

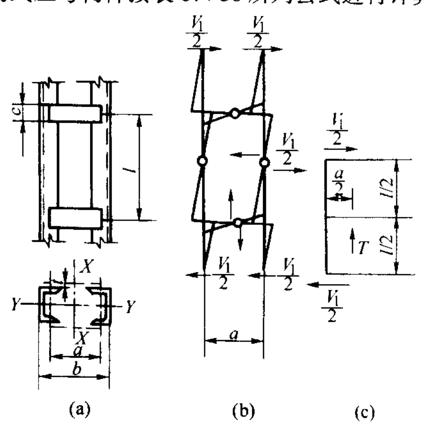


图 6.4-39　缀板计算简图

表 6.4-32　实腹式轴心压杆的设计步骤

序号	内　容	具 体 方 法	备　注
1	假定长细比查 φ 值	一般取 $\lambda=60\sim100$，当 N 较大而计算长度较小时，λ 取小值，反之取较大值。并根据截面类型和钢材标号由 GB 50017—2003 中查得相应的 φ 值	
2	求所需面积	压杆所需毛截面面积按下式估算： $A_T=\frac{N}{\varphi f}$　(6.4-70)	
3	求所需截面回转半径	按下式计算出对应于假定长细比的回转半径： $i_x^T=\frac{l_{0x}}{\lambda_x}$　(6.4-71) $i_y^T=\frac{l_{0y}}{\lambda_y}$　(6.4-72)	从等稳条件出发，一般取 $\lambda_x\approx\lambda_y$
4	求截面轮廓尺寸	按表 6.4-33 中截面回转半径和轮廓尺寸的近似关系确定截面 高度　$h_T=\frac{i_x^T}{a_1}$　(6.4-73) 宽度　$b_T=\frac{i_y^T}{a_2}$　(6.4-74)	对焊接组合工字形截面，由公式(6.4-73)确定的 h_T 一般偏小，设计时可取 $h_T\approx b_T=\frac{i_y^T}{a_2}$
5	选配截面	根据 A_T、h_T、b_T 以及局部稳定（见表 6.4-27）和便于制作施焊等条件确定截面各部分尺寸	对型钢截面，可直接按 A_T、i_x^T、i_y^T 由型钢表中查出适合的截面
6	截面验算和调整	按截面尺寸算出截面特征，并重新计算 λ_x、λ_y。按表 6.4-21 的要求和表 6.4-27 的公式对压杆进行验算，如有不合适的地方，应对截面尺寸加以调整，直到合适为止	

表 6.4-33　各种截面回转半径的近似值

	$i_x=0.30h$ $i_y=0.90b$ $i_z=0.195h$		$i_x=0.32h$ $i_y=0.20b$		$i_x=0.28h$ $i_y=0.21b$		$i_x=0.45h$ $i_y=0.24b$
	$i_x=0.32h$ $i_y=0.28b$ $i_z=0.18\frac{b+h}{2}$		$i_x=0.28h$ $i_y=0.24b$		$i_x=0.21h$ $i_y=0.21b$ $i_z=0.185h$		$i_x=0.40h$ $i_y=0.21b$



续表 6.4-33

截面	回转半径	截面	回转半径	截面	回转半径	截面	回转半径
	$i_x=0.30h$ $i_y=0.215b$		$i_x=0.30h$ $i_y=0.17b$		$i_x=0.21h$ $i_y=0.21b$		$i_x=0.45h$ $i_y=0.235b$
	$i_x=0.44h$ $i_y=0.28b$		$i_x=0.39h$ $i_y=0.29b$		$i_x=0.44h$ $i_y=0.38b$		$i_x=0.29h$ $i_y=0.45b$
	$i_x=0.43h$ $i_y=0.43b$		$i_x=0.60b$ $i_y=0.38h$		$i_x=0.37b$ $i_y=0.54h$		$i_x=0.29h$ $i_y=0.29b$
	$i_x=0.39h$ $i_y=0.20b$		$i_x=0.44b$ $i_y=0.38h$		$i_x=0.37h$ $i_y=0.45b$		$i_x=0.25d$
	$i_x=0.42h$ $i_y=0.22b$		$i_x=0.32h$ $i_y=0.58b$		$i_x=0.40h$ $i_y=0.24b$		$i_x=0.35\dfrac{d+D}{2}$
	$i_x=0.43h$ $i_y=0.24b$		$i_x=0.32h$ $i_y=0.40b$		$i_x=0.41h$ $i_y=0.22b$		$i_x=0.39h$ $i_y=0.53b$
	$i_x=0.365h$ $i_y=0.275b$		$i_x=0.38h$ $i_y=0.21b$		$i_x=0.32h$ $i_y=0.49b$		$i_x=0.44\dfrac{h_1+h_2}{2}$ $i_y=0.41\dfrac{b_1+b_2}{2}$
	$i_x=0.35h$ $i_y=0.56b$		$i_x=0.44h$ $i_y=0.32b$		$i_x=0.29h$ $i_y=0.50b$		$i_x=0.47h$ $i_y=0.40b$

表 6.4-34　格构式轴心压杆的设计步骤

序号	内　容	具　体　方　法	备　　注
1	选分肢截面	首先绕实轴按表 6.4-32 所列的步骤试选分肢截面，并计算 λ_y	分肢一般多选用型钢截面
2	确定分肢间距	1）按下式确定绕虚轴的长细比，对 缀条柱　$\lambda_x=\sqrt{\lambda_y^2-27\dfrac{A}{A_1}}$　(6.4-75) 缀板柱　$\lambda_x=\sqrt{\lambda_y^2-\lambda_1^2}$　(6.4-76) 2）按下式确定相应的回转半径 $i_x=\dfrac{l_{0x}}{\lambda_x}$ 3）按表 6.4-33 确定 b $b=\dfrac{i_x}{a_1}$　(6.4-77)	对缀条柱需按构造先假定缀条截面积 A_1，对缀板柱需按构造先假定 $\lambda_1\leqslant40$ 和 $\leqslant0.5\lambda_y$
3	缀件设计	按表 6.4-31 设计缀件截面和连接	
4	截面验算	按截面尺寸算出截面特性，并重新计算 λ_{0x}（表 6.4-30），按表 6.4-21 的要求和表 6.4-27 的公式对压杆进行验算，如有不合适的地方，应对截面尺寸加以调整，直到合适为止	

表 6.4-35 实腹式压弯构件计算公式

序号	计算内容	计算公式	备注
1	强度	$\dfrac{N}{A_n} \pm \dfrac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} \pm \dfrac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leqslant f$ (6.4-78)	适用于弯矩作用于主平面内的压弯和拉弯构件
2	整体稳定性 / 弯矩作用在对称轴平面内 / 弯矩作用平面内的稳定	$\dfrac{N}{\varphi_x A} + \dfrac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{1x}\left(1-0.8\dfrac{N}{N_{Ex}}\right)} \leqslant f$ (6.4-79) $\left\lvert \dfrac{N}{A} - \dfrac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{2x}\left(1-1.25\dfrac{N}{N_{Ex}}\right)} \right\rvert \leqslant f$ (6.4-80)	式（6.4-80）仅用于弯矩作用在单轴对称截面使较大翼缘受压时的补充验算
	整体稳定性 / 弯矩作用在对称轴平面内 / 弯矩作用平面外的稳定	$\dfrac{N}{\varphi_y A} + \dfrac{\beta_{tx} M_x}{\varphi_b W_{1x}} \leqslant f$ (6.4-81)	
	整体稳定性 / 弯矩作用在两个主平面内的双轴对称实腹式工字形和箱形截面的压弯构件	$\dfrac{N}{\varphi_x A} + \dfrac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{1x}\left(1-0.8\dfrac{N}{N_{Ex}}\right)} + \dfrac{\beta_{ty} M_y}{\varphi_{by} W_{1y}} \leqslant f$ (6.4-82) $\dfrac{N}{\varphi_y A} + \dfrac{\beta_{tx} M_x}{\gamma_{bx} W_{1x}} + \dfrac{\beta_{my} M_y}{r_y W_{1y}\left(1-0.8\dfrac{N}{N_{Ey}}\right)} \leqslant f$ (6.4-83)	
3	局部稳定性 / 翼缘	与表 6.4-14 的规定相同	
	局部稳定性 / 腹板 / 工字形截面	当 $0 \leqslant a_0 \leqslant 1.6$ 时 $\dfrac{h_0}{t_w} \leqslant (16a_0 + 0.5\lambda + 25)\sqrt{\dfrac{235}{f_y}}$ (6.4-84) 当 $1.6 \leqslant a_0 \leqslant 2.0$ 时 $\dfrac{h_0}{t_w} \leqslant (48a_0 + 0.5\lambda + 26.2)\sqrt{\dfrac{235}{f_y}}$ (6.4-85)	
	局部稳定性 / 腹板 / 箱形截面	当 $0 \leqslant a_0 \leqslant 1.6$ 时 $\dfrac{h_0}{t_w} \leqslant (12.8a_0 + 0.4\lambda + 20)\sqrt{\dfrac{235}{f_y}}$ (6.4-86) 当 $1.6 \leqslant a_0 \leqslant 2.0$ 时 $\dfrac{h_0}{t_w} \leqslant (38.4a_0 + 0.4\lambda - 21)\sqrt{\dfrac{235}{f_y}}$ (6.4-87)	当 $\dfrac{h_0}{t_w} < 40\sqrt{\dfrac{235}{f_y}}$ 时，应采用 $40\sqrt{\dfrac{235}{f_y}}$
	局部稳定性 / 腹板 / T形截面	当 $a_0 \leqslant 1.0$ 时 $\dfrac{h_0}{t_w} \leqslant 15\sqrt{\dfrac{235}{f_y}}$ (6.4-88) 当 $a_0 > 1.0$ 时 $\dfrac{h_0}{t_w} \leqslant 18\sqrt{\dfrac{235}{f_y}}$ (6.4-89)	

注：1. N、M_x、M_y 为所计算构件段范围内的轴心压力、对强轴和弱轴的最大弯矩；γ_x、γ_y 为截面塑性发展系数，应按表 6.4-4 采用；φ_x、φ_y 为对强轴 $x-x$ 和弱轴 $y-y$ 的轴心受压构件稳定系数；N_{Ex}、N_{Ey} 为欧拉临界力，$N_{Ex}=\pi^2 EA/\lambda_x^2$，$N_{Ey}=\pi^2 EA/\lambda_y^2$；$W_{1x}$、$W_{2x}$ 为弯矩作用平面内对较大受压纤维的毛截面抵抗矩和对较小受压或较大受拉纤维的毛截面抵抗矩；W_{1y} 为对弱轴的毛截面抵抗矩。

2. β_{mx}（β_{my}）为等效矩系数，应按下列规定采用。

（1）弯矩作用平面内有侧移的框架柱以及悬臂构件，$\beta_{mx}=1.0$；

（2）无侧移框架柱和两端支承的构件

1）无横向载荷作用时：

$$\beta_{mx} = 0.65 + 0.35\frac{M_2}{M_1} \tag{6.4-90}$$

$$\beta_{mx} \geqslant 0.4 \tag{6.4-91}$$

M_1 和 M_2 为端弯矩，$|M_1| \geqslant |M_2|$，使构件产生同向曲率（无反弯点）时取同号，使构件产生反向曲率（有反弯点）时取异号。

2）有端弯矩和横向载荷同时作用时：使构件产生同向曲率时，$\beta_{mx}=1.0$；使构件产生反向曲率时，$\beta_{mx}=0.85$。

3）无端弯矩但有横向作用时：当跨度中点有一个横向集中载荷作用时，

$$\beta_{mx} = 1 - 0.2\,N/N_{Ex} \tag{6.4-92}$$

其他载荷情况时，$\beta_{mx}=1.0$。

3. β_{tx}（β_{ty}）为等效弯矩系数，应按下列规定采用。

在弯矩作用平面外有支承的构件，应根据两相邻支承点间构件段内的载荷和内力情况确定。

1）所考虑构件段无横向载荷作用时

$$\beta_{tx} = 0.65 + 0.35\frac{M_2}{M_1} \tag{6.4-93}$$

M_1 和 M_2 是在弯矩作用平面内的端弯矩，正负号及取值的规定同式（6.4-90），$\beta_{tx} \geqslant 0.4$。

2）所考虑构件段内有端弯矩和横向载荷作用时，使构件段产生同向曲率时，$\beta_{tx}=1.0$；使构件段产生反向曲率时，$\beta_{tx}=0.85$。

3）悬臂构件，$\beta_{tx}=1.0$。

4. φ_{bx}、φ_{by} 为均匀弯曲的受弯构件的整体稳定系数，对工字形截面，φ_{bx} 可按表 6.4-10 确定，φ_{by} 可取 1.0；对箱形截面，可取 $\varphi_{bx}=\varphi_{by}=1.4$；$\varphi_b$ 为均匀弯曲的受弯构件的整体稳定系数，对工字形和 T 形截面可按表 6.4-10 确定，对箱形截面可取 $\varphi_b=1.4$。

表 6.4-36　格构式压弯构件计算公式

项次	计算内容			计算公式	备注
1	整体稳定性	弯矩绕虚轴作用	弯矩作用平面内	$$\frac{N}{\varphi_x A}+\frac{\beta_{mx}M_x}{W_{1x}\left(1-\varphi_x\frac{N}{N_{Ex}}\right)}\leqslant f \qquad (6.4\text{-}94)$$	φ_x、N_{Ex}由换算长细比 λ_{0x} 确定，λ_{0x}按表 6.4-30 算得
			弯矩作用平面外	不必计算	但应验算分肢的稳定性
		弯矩绕实轴作用	弯矩作用平面内	按式（6.4-79）计算	
			弯矩作用平面外	$$\frac{N}{\varphi_x A}+\frac{\beta_{ty}M_y}{W_{1y}}\leqslant f \qquad (6.4\text{-}95)$$	按表 6.4-30 所算得的换算长细比 λ_{0x}查 φ_x
		弯矩作用在两个主平面内的双肢格构式压弯构件		$$\frac{N}{\varphi_x A}+\frac{\beta_{mx}M_x}{W_{1y}\left(1-\varphi_x\frac{N}{N_{Ex}}\right)}+\frac{\beta_{ty}M_y}{W_{1y}}\leqslant f \qquad (6.4\text{-}96)$$	
2	分肢稳定性	弯矩绕虚轴作用	缀条柱的分肢	缀条柱的分肢为实腹式轴心受压构件，其稳定性按式（6.4-52）计算。各分肢的轴力按下列公式确定。 双肢柱： 分肢 1，$N_1=\frac{Ny_2}{a}+\frac{N_x}{a}$　(6.4-97) 分肢 2，$N_2=N-N_1$　(6.4-98) 四肢柱： 分肢 1，$N_1=\frac{Ny_2}{2a}+\frac{M_x}{2a}$　(6.4-99) 分肢 2，$N_2=N-\frac{2N_1}{2}$　(6.4-100) 缀板柱的分肢为压弯构件，其稳定性应按表 6.4-35 的第 2 项的规定计算。分肢的轴力按式（6.4-97）及式（6.4-100）计算，所受弯矩按下式计算： $M_i=\frac{V_i l}{2}$　(6.4-101)	见图 6.4-40 式中，i 为分肢的编号；V_i 为分肢 i 的剪力，根据构件的实际剪力和按式（6.4-66）计算的剪力两者中的较大值计算；l 为缀板中心的间距
		弯矩作用于两个主平面内的双肢柱	缀条柱的分肢	缀条柱的分肢为压弯构件，其稳定性应按表 6.4-35 的第 2 项的规定计算。分肢的轴力按式（6.4-97）及式（6.4-98）计算，分肢的弯矩按下式计算： 分肢 1，$M_{y1}=\frac{I_1/y_1}{I_1/y_1+I_2/y_2}M_y$　(6.4-102) 分肢 2，$M_{y2}=\frac{I_2/y_2}{I_1/y_1+I_2/y_2}M_y$　(6.4-103)	分别对分肢 1 和分肢 2 进行验算
			缀板柱的分肢	缀板柱的分肢为双向受弯的压弯构件，应按表 6.4-35 的第 2 项的规定计算。分肢的轴力按式（6.4-97）和式（6.4-98）计算；弯矩 M_{y1}、M_{y2} 按式（6.4-102）和式（6.4-103）计算，M_{x1}、M_{x2}按式（6.4-101）计算	

注：$W_{1x}=I_x/y_0$，I_x 为对 x 轴的毛截面惯性矩，y_0 为由 x 轴到压力较大分肢的轴线距离或者到压力较大分肢腹板边缘的距离，按图 6.4-40 确定；W_{1y}为截面绕实轴的抵抗矩；$N_{Ex}=\frac{\pi^2 EA}{\lambda_{0x}^2}$；$I_1$、$I_2$ 为分肢 1、分肢 2 对 y 轴的惯性矩；y_1、y_2 为 M_y 作用的主轴平面至分肢 1、分肢 2 轴线的距离。

2.3　焊接柱的构造要求

2.3.1　肋板和横隔的设置

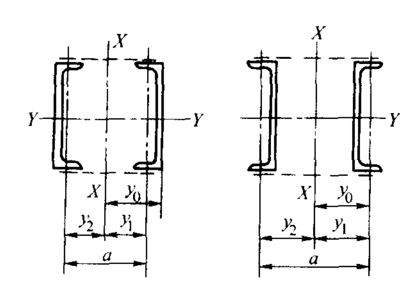
1）当实腹式柱的腹板计算高度 h_0 与厚度 t_w 之比大于 80 时，应采用横向加强肋加强，其间距不得大于 3 h_0。横向加强肋的尺寸和构造应按表 6.4-13 的有关规定采用。

2）在缀材面剪力较大或宽度较大的格构式柱，宜采用缀条柱。

缀板柱中，同一截面处缀板（或型钢横杆）的线刚度之和不得小于较大分肢线刚度的 6 倍。

3）格构式柱或大型实腹式柱，在受有较大水平力处和运送单元的端部应设置横隔（图 6.4-41）横隔的间距不得大于柱截面较大宽度的 9 倍或 8 m。

4）在进行偏心受压柱（压弯构件）设计时，一般按设计经验和构造要求（刚度和经济条件）先假定柱子的截面高度和宽度。对厂房框架柱，其截面高度可按表 6.4-37 选用。上柱截面宽度一般取 $b_2=$（0.4～0.6）h_2，下柱截面一般取 $b_1=$（0.25～0.5）h_1 或下柱高的$\frac{1}{20}\sim\frac{1}{30}$。式中 b_1、h_1 分别为下柱截面的宽度和高度；b_2、h_2 分别为上柱截面的宽度和高度。



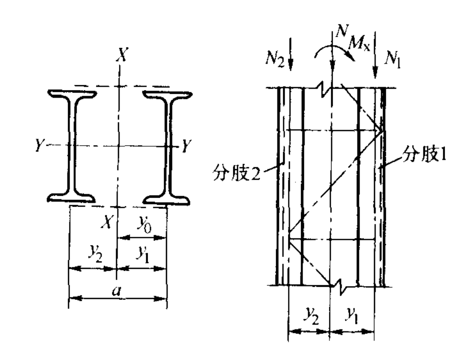


图 6.4-40　格构式压弯构件的截面尺寸和单肢受力情况

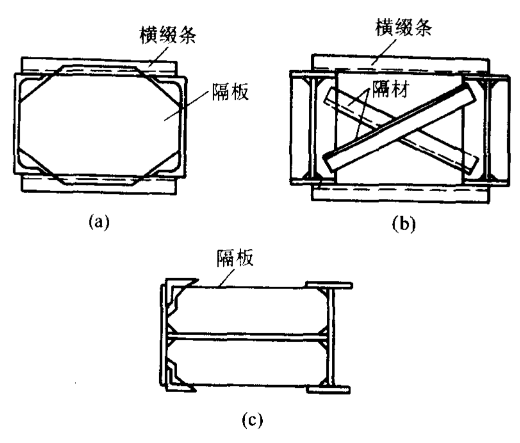


图 6.4-41　隔材布置

表 6.4-37　框架柱截面高度

柱段			轻、中级吊车工作时	重级工作制	
柱形式		柱段高/m		20 t < Q < 50 t	50 t < Q < 125 t
等截面		8 < H < 20	$(\frac{1}{15}\sim\frac{1}{20})H$	—	—
		H > 20	$(\frac{1}{20}\sim\frac{1}{30})H$		
单阶柱	上柱	4 < H_2	$(\frac{1}{10}\sim\frac{1}{20})H_2$	$(\frac{1}{7}\sim\frac{1}{10})H_2$	$(\frac{1}{5}\sim\frac{1}{10})H_2$
	下柱	10 < H < 20	$(\frac{1}{15}\sim\frac{1}{20})H$	$(\frac{1}{12}\sim\frac{1}{15})H$	$(\frac{1}{9}\sim\frac{1}{11})H$
		20 < H < 30	$(\frac{1}{20}\sim\frac{1}{25})H$	$(\frac{1}{11}\sim\frac{1}{13})H$	$(\frac{1}{10}\sim\frac{1}{14})H$

注：H_2——阶形柱上段高度；H——柱的全高。

2.3.2　柱头及柱与梁的连接

柱头承受施加的载荷并传给柱身，其构造与梁的端部构造密切相关。柱头设计要求传力可靠，构造简单和便于安装。

柱与梁的连接有铰接和刚接两种。后者梁与柱组成框架体系，能够承受水平力，并能减小梁中弯矩。

图6.4-42是柱与梁的铰接构造图。梁支承于柱顶（图6.4-42a、b）时，梁的反力通过柱的顶板传给柱身，顶板与柱身用焊缝连接，梁与顶板用高强螺栓连接。顶板厚度一般取16～30 mm。两梁之间可留一定的间隙，安装时用夹板或填板以螺栓连接。图6.4-42a连方式构造简单，柱头可传递较大的支座压力。但梁的反力不等时，柱将偏心受压。图6.4-42b连接方式即使梁的反力不等，也能使柱接近于轴心受压。但柱的腹板因受力较大易失稳，必须用肋板加强。

梁连接于柱侧时，梁的反力由焊在柱翼缘上的承托传递。采用T形承托（图6.4-42c）构造简单。用厚钢板制作的承托（图6.4-42d）适用于承受较大的压力，但制造和安装精度要求高，承托板的端部必须刨平顶紧，以便直接传递压力。

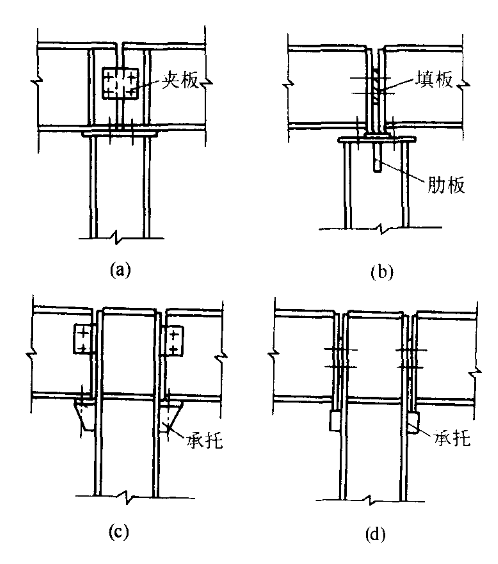


图 6.4-42　柱与梁的铰接构造

2.3.3　柱脚的设计

柱脚有铰接和刚接两种。前者仅承受轴心压力，不承受弯矩；后者可同时承受轴心压力和弯矩。柱脚是柱中用料较多且较费工的部分，设计时应力求合理，构造上要保证传力明确，有足够的强度和刚度，便于制造和安装。

（1）铰接柱脚

图6.4-43是典型的铰接柱脚形式。图6.4-43a最简单，柱端用角焊缝直接焊在底板上，适用于受力较小的柱。受力较大的柱常采用有靴梁柱脚（图6.4-43b、c），靴梁承受柱身载荷并将其传至底板上。底板尺寸较大时，为提高底板抗弯刚度，可在靴梁之间或外侧用肋板加强（图6.4-43d～f）。底板厚度不宜小于20 mm。

（2）刚接柱脚

刚接柱脚有整体式和分离式两种。实腹柱和轻型格构柱常采用整体式柱脚（图6.4-44）；肢间距离很大的格构柱宜采用分离式柱脚（图6.4-45）。为保证运输和安装时柱脚的整体刚性，可在分离柱脚的底板之间设置联系杆。

2.4　焊接柱结构设计实例

本节例举单层工业厂房框架柱中两种典型柱子的焊接结构。

2.4.1　单层工业厂房的框架柱简介

单层工业厂房的框架柱按结构形式不同，可分为等截面柱、阶形柱和分离式柱三大类；按柱截面类型不同又可分为实腹式柱及格构式柱两类。



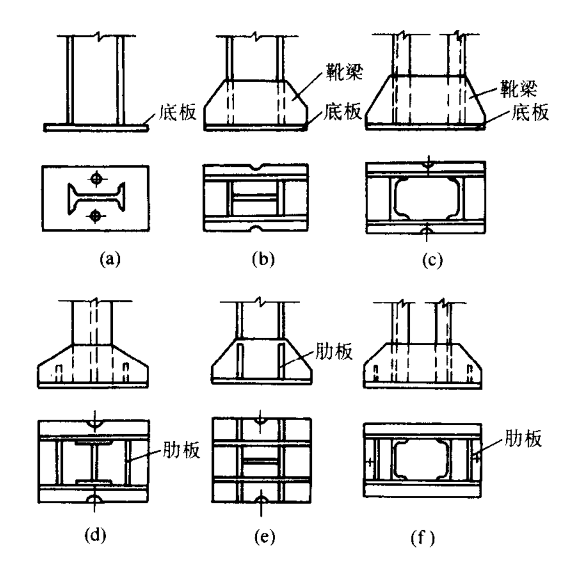


图 6.4-43　铰接柱脚

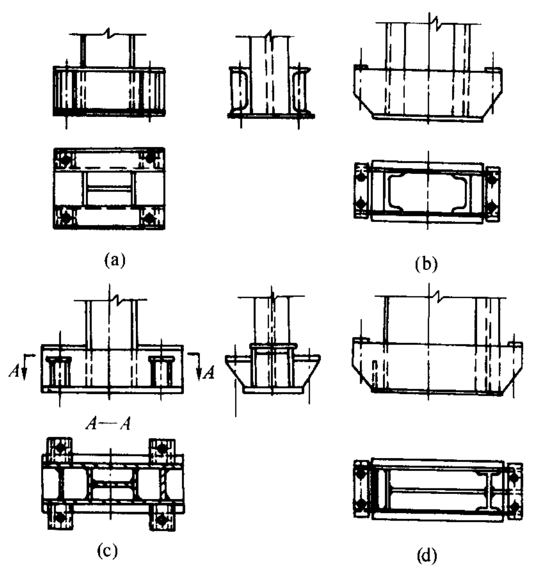


图 6.4-44　整体式柱脚

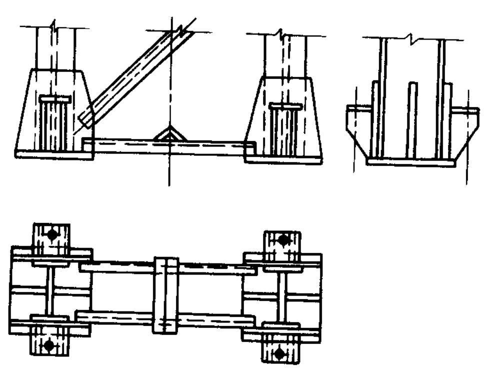


图 6.4-45　分离式柱脚

1）等截面柱（图 6.4-46a），一般适于用作工作平台柱，无吊车或吊车起重量 $Q < 15$ t、柱距 $l \leqslant 12$ m 的轻型厂房中的框架柱等。常为实腹柱，亦可为格构式柱。

2）阶形柱（图 6.4-46b、c），为单层工业厂房中的主要柱型，亦可分为实腹式柱和格构式柱两种。由于吊车梁（或吊车桁架）支承在下段柱顶而形成上下段柱的阶形突然变化。其上段柱一般采用实腹式截面，下段柱当柱高不大（$h \leqslant 1\,000$ mm）时，宜采用实腹式截面；而当柱高较大（$h > 1\,000$ mm）时，为节约用材一般多采用格构式截面。

3）分离式柱（图 6.4-46d），由支承屋盖结构的厂房框（排）架柱与一侧独立承受吊车梁荷重的分离柱肢相组合而成。二者之间以水平板件铰接。分离式柱具有吊车肢可灵活设置的特点宜用于下列情况。

① 邻跨为扩建跨，其吊车柱肢可以在扩建时再设置的情况。

② 相邻两跨吊车的轨顶标高相差悬殊而低跨吊车起重量又较大时。

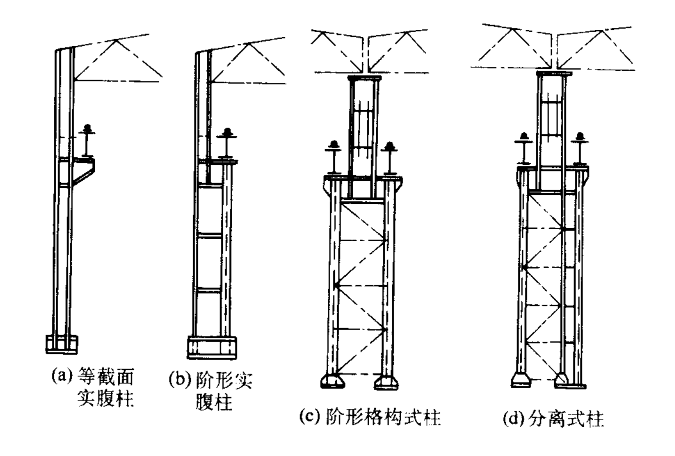


图 6.4-46　单层厂房柱

常用于厂房的实腹柱截面如图 6.4-47 所示。热轧工字钢（图 6.4-47a）在弱轴方向的刚度较小（仅为强轴方向刚度的 1/7 ~ 1/4），适用于轻型平台柱及分离柱柱肢等；焊接（或轧制）H 型钢（图 6.4-47b）为实腹柱最常用截面，适用于重型平台柱、框架柱、墙架柱及组合柱的分肢、变截面柱的上段柱等；型钢组合截面（图 6.4-47c、d、e）可按强轴、弱轴方向不同的受力或刚度要求较合理的进行截面组合，适用于偏心受力并载荷较大的厂房框架柱的下段柱等；十字形截面（图 6.4-47f）适用于双向均要求较大刚度及双向均有弯矩作用时，其承载能力较大的柱，如多层框架的角柱以及重型平台柱等；当有观感或其他特殊要求时也可以采用管截面柱（图 6.4-47g、h）。

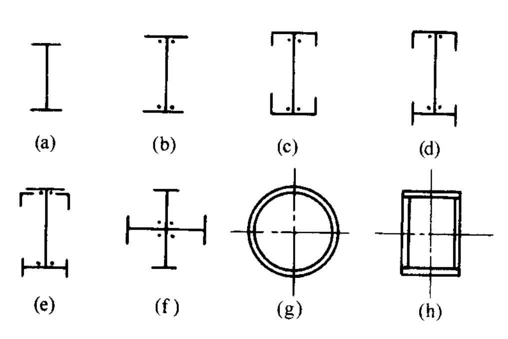


图 6.4-47　实腹柱截面形式

格构式组合截面见图 6.4-48。当柱承受较大弯矩作用，

或要求较大刚度时，为了合理用材宜采用格构式组合截面。

格构式组合截面一般由每肢为型钢截面的双肢组成，当采用钢管（包括钢管混凝土）组合柱时，也可采用三肢或四肢组合截面（图6.4-48g、h）。格构柱的柱肢之间均由缀条或缀板相连，以保证组合截面整体工作。

槽钢组合截面（图6.4-48a）可用于平台柱，轻型刚架柱及墙架柱等；带有H型钢或工字钢的组合截面（图6.4-48b～e）是有吊车厂房阶形变截面格构柱下段柱最常用的截面，图6.4-48b、e为边列柱截面，其双肢分别为支承屋盖肢及支承吊车肢；图6.4-48c、d为中列柱截面，其双肢均为支承吊车肢；钢管组合截面（图6.4-48g、h）分别为边列或中列厂房变截面柱所采用截面。

2.4.2　厂房框架柱实例

（1）实腹式阶形焊接柱（图6.4-49）

该柱为多跨厂房中的边柱，上柱与屋架刚接，下柱与基础刚接。吊车梁为突缘支座，用整体式柱脚。材料为Q235-B·F。上柱为双轴对称的工字形截面，下柱为单轴对称工字截面，支承吊车梁一侧翼缘为工字形截面。钢柱主要焊缝用自动焊，其余用焊条电弧焊。

（2）格构式阶形焊接柱（图6.4-50）

该柱的下柱为管子焊接结构，构造很简单，零件少。柱头和柱脚均用较强的十字加劲肋加强，且是径向贯穿管端，载荷传递和局部刚性都较好。上柱为工字形截面（图中没表示）。

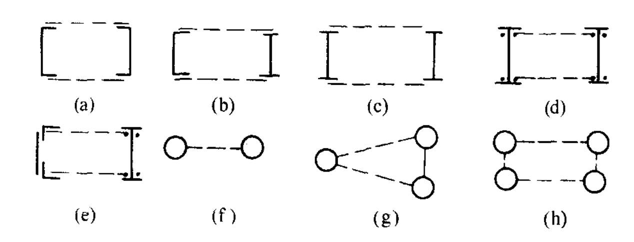


图6.4-48　格构式柱截面

图6.4-49　实腹式阶形柱焊接结构

（钢材Q235-B·F，焊条E4300～E4313型；未注明螺栓直径$\phi 20$，孔$d=21.5$）

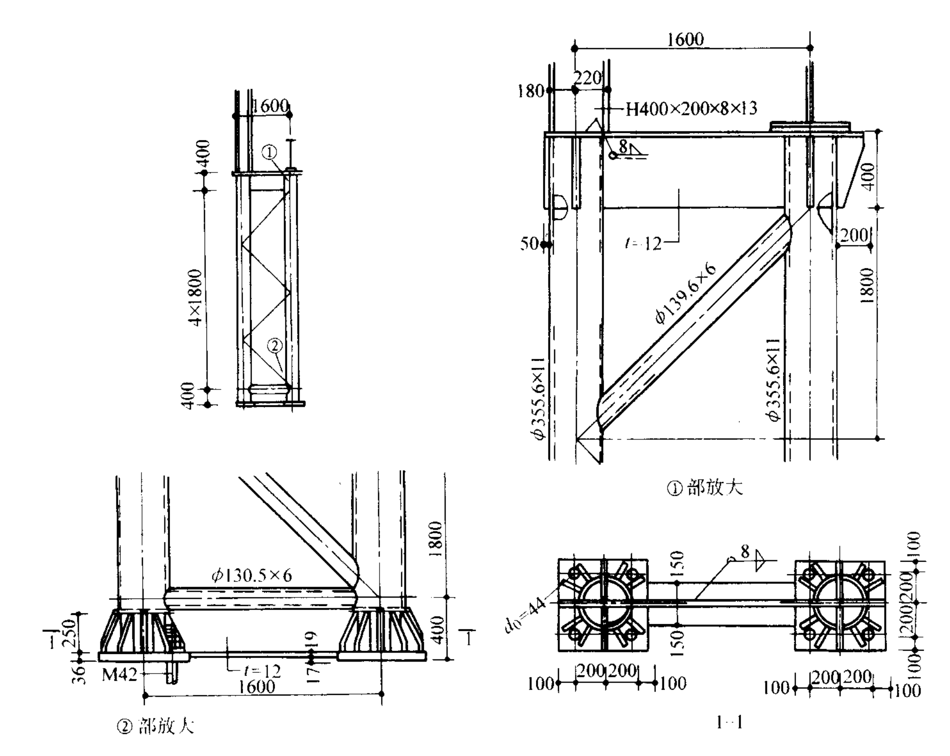


图 6.4-50 格构式阶形柱焊接结构

3 焊接桁架

3.1 桁架的工作特点和结构特点

焊接桁架是指由直杆在节点处通过焊接相互连接组成的承受横向弯曲的格构式结构。是杆系结构典型之一。设计桁架时，要求杆件轴心线汇交在节点处并假定是理想的铰接，这些杆件组成几何不变的空间或平面体系。桁架中的大部分杆件只承受轴心力的作用，与实腹式受弯构件相比，受力合理，材料利用率高，耗料少，自重轻，施工周期短及安装方便，可做成各种几何外形，易满足各种不同的使用要求，尤其适用于大跨度的结构。所以，广泛用于建筑、桥梁、起重机械、塔架等结构中。图 6.4-51 示出各类桁架在工程上的应用示例。

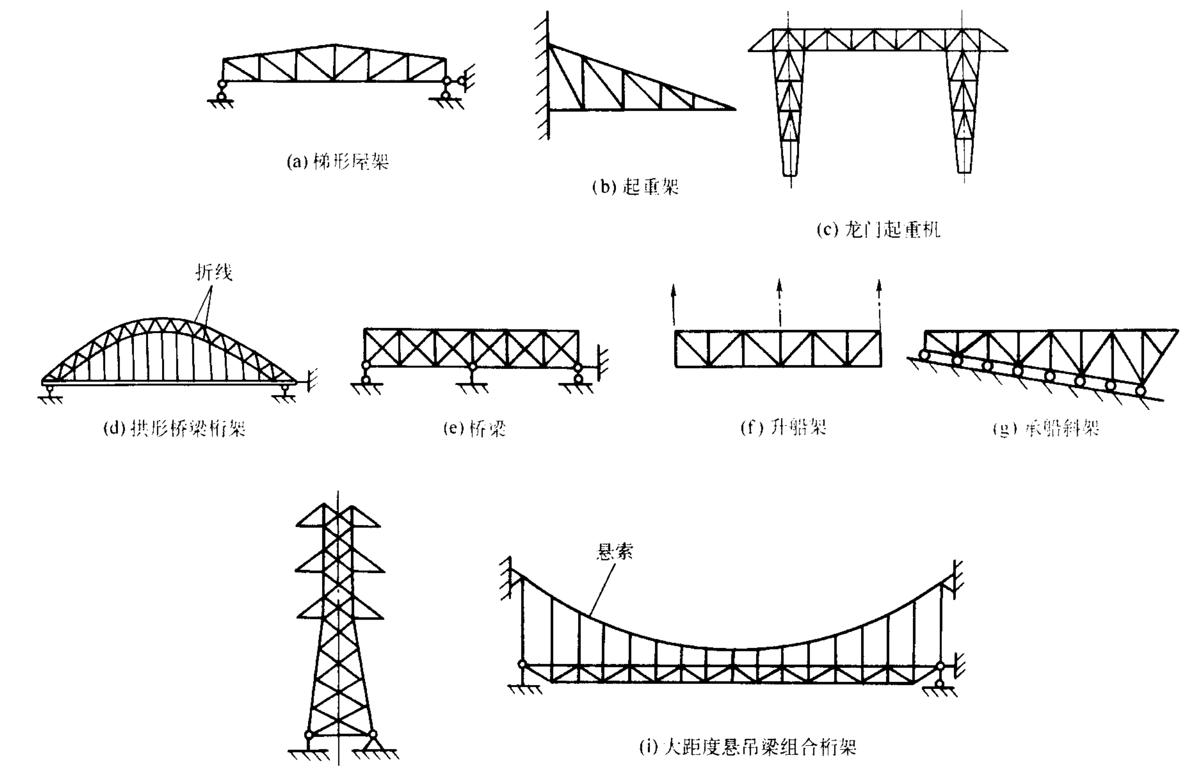


图 6.4-51 焊接桁架在工程上的应用示例

桁架有平面桁架和空间桁架，空间桁架由各平面桁架组成，因此平面桁架是研究桁架的基本对象。按平面桁架的外形轮廓可归纳为平行弦桁架、折曲线桁架和三角形桁架等类型，它们的外形轮廓越接近外载引起的弯矩图形，其弦杆受力就越合理。每类中又可按腹杆不同布置而细分，见表6.4-38所示的各种平面桁架的形式。根据承受载荷大小的不同，又可分为重型桁架（如图6.4-51所示的桥梁桁架等）、普通桁架和轻钢桁架（见图6.4-52）。重型桁架的节点板多为双壁式的，其他多为单壁式的。

表 6.4-38　平面桁架的形式

图　　形	说　明	图　　形	说　明
平行弦桁架		折曲线桁架	
N形	N形桁架。抗剪性差，但可选择最短压杆长度	折曲线	上弦杆为折曲线形
α W形	W形桁架。α倾角一般为45°，抗剪刚度强	折曲线	上、下弦杆均为折曲线形
W派生形	W形派生式桁架。可缩短受压弦杆的节间长度		下弦杆为折曲线形
		三角形桁架	
再分式	再分式桁架。可缩小节间长度	三角形	上弦杆在支承节点处形成锐角，内力较大
α 十字形	十字形桁架。α倾角约为45°	三铰拱式	较多用于轻型屋架
α 菱形	菱形桁架。α倾角约为45°	弓弦拱式	改善上弦杆受力情况
K形	K形桁架	梯形	改善受力情况

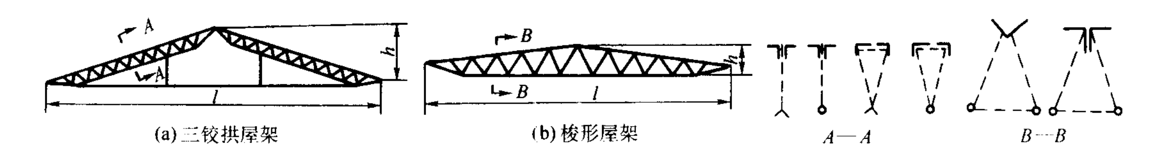


图 6.4-52　轻钢屋架

桁架的腹杆布置应考虑经济和适用。布置腹杆时，一般要求避免非节点载荷引起受压弦杆局部弯曲；尽量使长腹杆受拉，短腹杆受压；腹杆数量宜少，总长度要短；节点构造要简单合理。图 6.4-53 给出了常用的几种腹杆布置方法。对两端简支的层盖桁架，当下弦无悬吊载荷时，以人字形腹杆体系和再分式腹杆体系较为优越。当下弦有悬吊载荷时应采用带竖杆的人字形腹杆。桥梁结构中多用带竖杆的三角形和米字形腹杆体系，起重机械和塔架结构多采用交叉斜杆体系。

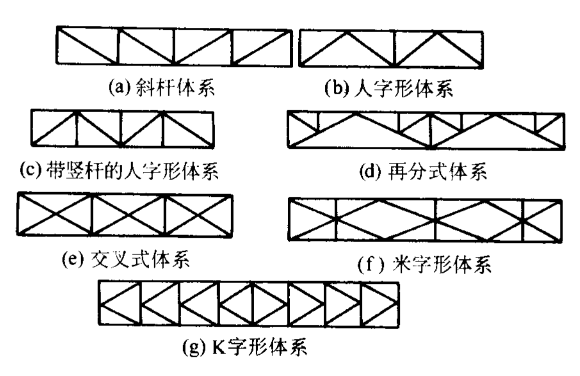


图 6.4-53　桁架的腹杆体系

桁架形式的确定一般与使用要求、桁架的跨度和载荷的类型及大小等因素有关。总的原则是适用、经济和制造简单。以屋盖结构为例，屋架的外形常由层面材料的排水坡度确定，表 6.4-39 给出了常用屋面材料及其适宜的屋架形式。

表 6.4-39　常用屋面材料及其适宜的层架形式

序号	屋面材料	坡度（i）	标志檩距/m	层架形式
1	石棉水泥小波瓦	1/3 ~ 1/2.5	0.75	三角形屋架（也可用三铰拱屋架）
2	石棉水泥中波瓦		0.75 ~ 1.05	
3	石棉水泥大波瓦		1.25	
4	钢丝网水泥波形瓦	1/3	1.50	
5	预应力混凝土槽瓦	1/3	3.00	
6	瓦楞铁	1/5 ~ 1/3	0.75	
7	压制钢板	1/5 ~ 1/3	1.50 ~ 6.00	梯形、人字形或下撑式屋架（也可用梭形屋架）
		1/30 ~ 1/8	1.50 ~ 6.00	
8	钢肋混凝土槽瓦或加气混凝土板	1/12 ~ 1/8	3.00 或无檩	梯形、人字形或下撑式屋架
9	大型屋面板	1/12 ~ 1/8	无檩	

3.2　焊接桁架的设计与计算

焊接桁架的设计应满足强度、刚度和稳定性的要求。一般桁架的刚度多由桁架的高跨比控制。桁架结构的承载力主要靠各组成杆件的强度和稳定性以及节点的强度来保证。桁架的整体稳定性通过合理的布置支撑体系或横向联系结构取得，不同用途的桁架结构应根据相应的规范进行设计。如起重机金属结构的桁架应符合《起重机设计规范》（GB 50017—2003）的规定，厂房钢结构的桁架应符合《钢结构性设计规范》(GB 50017—2003）和《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002）的规定。

3.2.1　桁架的主要尺寸

1）跨度　桁架的跨度一般由使用条件确定，同时应符合模数。对于建筑结构，柱网横向轴线的间距是屋架的标志跨度，以 3 m 为模数。屋架的计算跨度为屋架两端支座之间的距离。根据屋架的支承方式和柱网与支承点之间的相互关系，可由标志跨度确定计算跨度。表 6.4-40 给出了标志跨度和计算跨度之间的关系。

2）跨中高度　桁架跨中高度由经济、刚度、建筑要求和运输界限等因素决定。表 6.4-41 给出了常用桁架的高跨比，满足此要求的桁架一般可不做刚度验算。需要铁路运输的桁架起运单元，其最大轮廓高度不可大于 3.85 m。

3）起拱　两端简支、跨度为 15 m 或 15 m 以上的三角形屋架和跨度为 24 m 和 24 m 以上的梯形和平行弦桁架，当下弦无曲折时，宜起拱，拱度约为跨度的 1/500（图 6.4-54）。

表 6.4-40　屋架计算跨度

序号	柱网类型		计算跨度	备　注
1	封闭结合		$l_0 = l - (300 \sim 400\ \text{mm})$	屋架简支于钢肋混凝土柱或砖墙上
2	非封闭结合	屋架简支于钢肋混凝土柱上，支点与柱网轴线重合	$l_0 = l$	
3		屋架刚接于钢柱侧	$l_0 = l -$ 支点内移尺寸	支点内移尺寸为柱网轴线与支点间的距离

注：l ——屋架标志尺寸；l_0 ——屋架计算跨度。

3.2.2　桁架的内力计算和组合

（1）屋盖桁架的内力计算和组合。

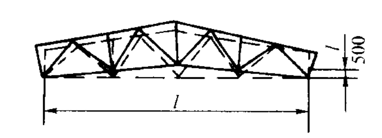
1）进行桁架内力分析之前，应按下式将各种面载荷汇集成节点载荷（图 6.4-55）：

$$P_i = \gamma_i q_k a s \qquad (6.4\text{-}104)$$

式中，q_k 为每平方米屋面水平投影面上的标准载荷值，由于屋面构造层的质量沿屋面分布，计算时需把它化到水平投影面上去，即 $q_k = g/\cos\alpha$，g 为沿屋面坡向作用的载荷，α 为上弦与水平面的夹角；γ_i 为载荷分项系数；对永久载荷取 1.2，对可变载荷取 1.4；a 为屋架弦杆节间的水平长度；s 为屋间的间距。

表 6.4-41　常用桁架的高跨比

项次	桁架类型		高跨比	备　注
1	屋架	三角形屋架	$\frac{1}{6}\sim\frac{1}{4}$	
2		梯形、平行弦和下撑式屋架	$\frac{1}{10}\sim\frac{1}{6}$	与柱刚接的梯形屋架或人字屋架的端高与跨度之比一般为$\frac{1}{18}\sim\frac{1}{12}$
3		三铰拱屋架	$\frac{1}{6}\sim\frac{1}{4}$	斜梁截面高度与其长度之比为$\frac{1}{18}\sim\frac{1}{12}$
4		梭形屋架	$\frac{1}{12}\sim\frac{1}{9}$	
5	桥式吊车桁架		$\frac{1}{18}\sim\frac{1}{10}$	一般用于起重量小于 5 t 的中轻级吊车中
6	桥梁桁架		$\frac{1}{7}\sim\frac{1}{5}$	



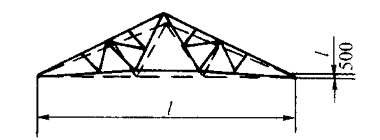


图 6.4-54　桁架起拱

屋架及支撑自重的载荷 q_k（kPa）可按下列经验公式估算：

$$q_k = 0.12 + 0.011l \tag{6.4-105}$$

式中，l 为屋架的标志跨度，m。当不设吊顶时，可假定屋架自重全部作用在上弦节点上；有吊顶时，则平均分配于上、下弦节点。

当设有悬挂吊车时，必须考虑悬挂吊车的具体连接情况。求出其对屋架的最大作用力。对于风载，当屋面与水平面的倾角小于 30°时，一般可不考虑；但对于轻屋面、开敞式房屋以及风荷大于 490 Pa 时，则应按照《建筑结构荷载规范》（GB 5009—2001）的规定计算风荷作用。

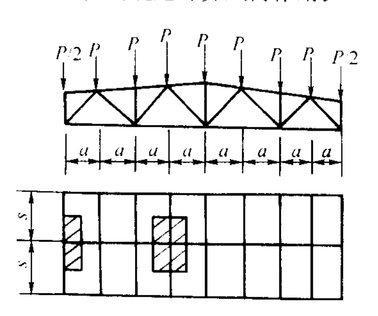


图 6.4-55　屋架节点荷载汇集简图

2）计算杆力时，假定屋架为理想铰接杆件体系，载荷均作用于节点上，用图解法或数解法计算屋架杆件的轴心力。当屋架上弦杆有节间载荷时，上弦杆的局部弯矩可近似按图 6.4-56 取用。端节间的正弯矩取为 $0.8M_0$；其他节间的正弯矩和节点负弯矩均取为 $0.6M_0$。M_0 为相应节间作为单跨简支梁计算的最大弯矩。

3）空间桁架结构的内力可按空间铰接杆件体系计算，也可按图 6.4-57 所示，将空间桁架分解成三片平面桁架计算杆力，最后利用叠加原理求得空间桁架杆力。

4）与柱刚接的屋架，还应根据框架内力分析所得的屋架端弯矩和水平力，计算桁架杆件内力。对人字形屋架，当屋架轴线坡度大于 1/7 时，应将屋架视为折线横梁进行框架分析，求得端弯矩和水平力，计算桁架杆力。

5）应按下述规定，进行杆件的内力组合。当屋架与柱铰接时，一般应考虑以下三种载荷组合

① 全跨恒载 + 全跨活载。

② 全跨恒载 + 半跨活载。

③ 屋架、支撑和天窗自重 + 半跨屋板重 + 半跨使用载荷。

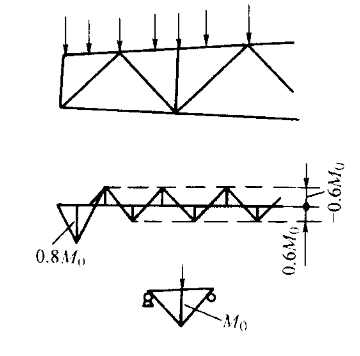


图 6.4-56　上弦杆受节间载荷的局部弯矩

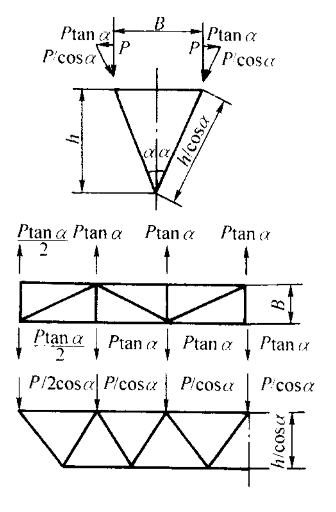


图 6.4-57　空间桁架的简化计算



对轻质屋面材料的屋架，当屋面永久载荷（载荷分项系数取1.0）小于负风压（载荷分项系数取1.4）的影响时，应考虑屋架受拉杆可能在风吸力下变成压杆的组合（图6.4-58）。当轻屋面用于厂房结构，且吊车起重量较大（$Q \geq$ 300 t）时，应考虑按框架分析求得的柱顶水平力是否会引起屋架下弦内力变号或使下弦拉力增加的组合。

当屋架与柱刚接时，除应按上述规定计算杆件内力外，还应根据框架内力分析求得的屋架端弯矩和水平力，考虑可能使屋架下弦受压；可能使上下弦杆力增加；可能使腹杆内力增加或可能使受拉腹杆变压杆等4种不利情况进行组合（图6.4-59）。实际组合时，应使一端弯矩为最大，水平力和另一端的弯矩为相应大，计算杆力时，将端弯矩用一组力偶 $H = M/h_0$ 代替（图6.4-59）。将上述4种情况产生的杆力与按铰接屋架求得的杆力组合，即得刚接屋架各杆件的最不利内力。

（2）有移动载荷的桁架内力计算和组合

桥式吊车桁架和桥桁架等主要受移动载荷的作用，应运用影响线理论求得在移动载荷下各杆件的最大内力，再与结构自重和风荷作用产生的杆力组合求得计算杆力。

3.2.3 普通钢桁架杆件的截面选择

（1）桁架杆件的计算长度和允许长细比

桁架杆件的计算长度应按本章2.2的有关规定取用。桁架的受压杆件的容许长细比按表6.4-21取用，受拉杆件的容许长细比按表6.4-42取用。

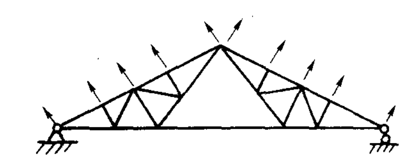


图6.4-58 桁架受风吸力作用

（2）桁架杆件的截面形式

确定桁架杆件截面形式时，应考虑满足经济、连接和制造简便并具有必要的刚度等几方面的要求。图6.4-60给出了常用的上下弦杆的截面形式。图6.4-60a～h适用于受压弦杆，图6.4-60i～o适用于受拉弦杆。图6.4-61给出了常用的腹杆截面形式。其中具有双壁的截面类型常用于重型桁架中，用来承受较大的内力。

表6.4-43列出了最常用的几种截面类型和它们的应用部位。

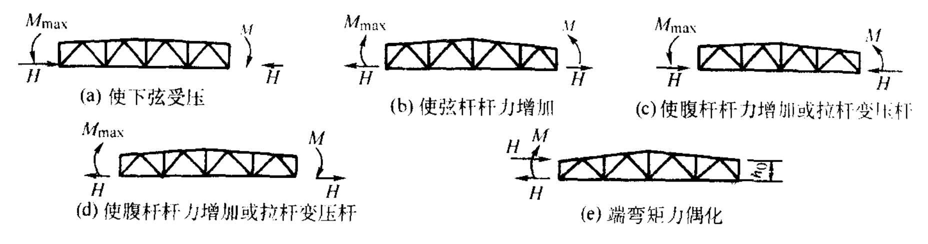


图6.4-59 最不利的端弯矩和水平力

表6.4-42 受拉构件的容许长细比

序　号	构件名称	承受静力载荷或间接承受动力载荷的结构		直接承受动力载荷的结构
		无吊车和有轻、中级工作制吊车的厂房	有重级工作制吊车的厂房	
1	桁架的杆件	350	250	250
2	吊车梁或吊车桁架以下的柱间支撑	300	200	—
3	支撑（第2项和张紧的圆钢除外）	400	250	—

注：1. 承受静力载荷的结构中，可仅计算受拉构件在竖向平面内的长细比。
2. 在直接或间接承受动力载荷的结构中，计算单角钢受拉构件的长细比时，应采用角钢的最小回转半径；在计算单角钢交叉受拉杆件平面外的长细比时，应采用与角钢肢边平行轴的回转半径。
3. 中、重级工作制吊车桁架下弦杆的长细比不宜超过200。
4. 在设有夹钳吊车或刚性料耙吊车的厂房中，支撑（表中第2项除外）的长细比不宜超过300。
5. 受拉构件在永久载荷与风载荷组合作用下受压时，其长细比不宜超过250。
6. 轻钢桁架中拉杆长细比不宜大于400。张紧的圆钢拉杆的长细比不受限制。

（3）桁架杆件的截面选择

桁架中的杆件，可分为轴心受拉、轴心受压、拉弯和压弯四种不同的受力情况。轴心受压和压弯杆，应按本章2.2的有关规定进行设计和计算。轴心受拉和拉弯杆应按表6.4-44的规定进行计算。

3.3 焊接钢桁架的节点设计与计算

3.3.1 型钢桁架节点

（1）型钢桁架节点设计要求

对于桁架杆件采用角钢、T形、工字形、H形钢的桁架，其节点设计应满足以下要求。

① 杆件截面的重心应与桁架的轴线重合，在节点处各杆应汇交于一点。为便于制作，对角钢和T形钢可取角钢肢背（或T形钢翼缘外边缘）到重心的距离以5 mm为模数。

② 角钢桁架弦杆变截面时，一般将接头设在节点处。为便于拼接，可使拼接处两侧角钢肢背齐平，为减小偏心，可取两角钢的重心线之间的中线与桁架轴线重合（图6.4-62a）。因轴线变动产生的偏心 e 不超过较大杆件截面高度的5%时，可不考虑其影响。

对重型桁架，弦杆变截面的接头应设在节点之外，以便简化节点构造（图6.4-62b）。

③ 桁架杆件宜直切（图6.4-63a），也可斜切（图6.4-63b、c），不允许采用图6.4-63d所示的切割方式。

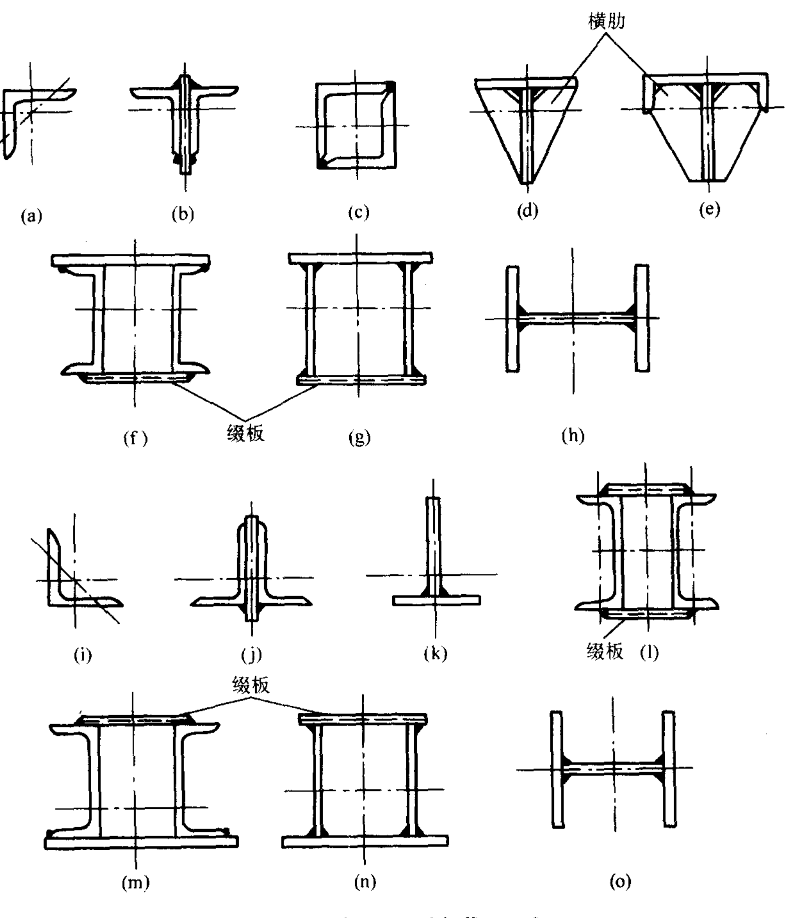


图 6.4-60　常用上下弦杆截面形式

表 6.4-43　桁架杆件截面形式

序号	杆件截面的型钢类型	截面形式	回转半径之比 i_y/i_x	应用部位
1	二不等边角钢短肢相连		2.0～2.5	上、下弦杆
2	二不等边角钢长肢相连		0.8～1.0	端斜杆（压杆）受节间载荷的上下弦杆
3	二等边角钢连成 T 形		1.3～1.5	腹杆、下弦杆
4	二等边角钢连成十字形		1.0	中央或端竖杆
5	单角钢		—	轻钢桁架杆件
6	单圆钢或双圆钢		—	轻钢桁架腹杆和下弦杆
7	无缝钢管或焊接钢管		1.0	空间桁架杆件



续表 6.4-43

序号	杆件截面的型钢类型	截面形式	回转半径之比 i_y/i_x	应用部位
8	焊接T形截面		根据等稳条件确定截面各部尺寸	上、下弦杆
9	焊接或热轧宽缘H形钢		1.5~6	重型桁架的上下弦杆

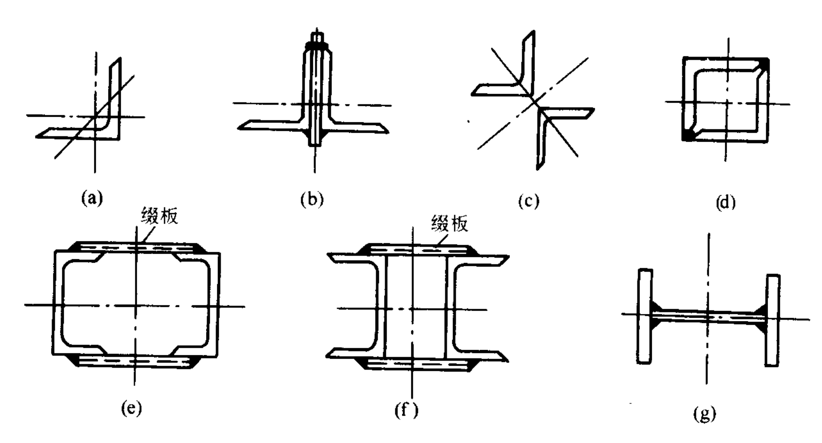


图 6.4-61 常用腹杆截面形式

表 6.4-44 轴心受拉和拉弯构件计算公式

序号	受力状态和验算项目	计算公式
1	轴心受拉杆强度验算	$\sigma=\frac{N}{A_n}\leqslant f$ (6.4-106)
2	拉弯杆强度验算	$\frac{N}{A_n}+\frac{M_x}{r_x W_{nx}}\leqslant f$ (6.4-107)
3	轴心受拉和拉弯杆刚度验算	$\lambda\leqslant[\lambda]$ (6.4-108)

注：N、M_x 为分别为轴力和绕 x 轴的弯矩；A_n 为杆件的净截面面积；r_x 为截面的塑性发展系数，按表 6.4-4 取用；W_{nx} 为对 x 轴的净截面抵抗矩；$[\lambda]$ 为拉杆的允许长细比，按表 6.4-42 取用。

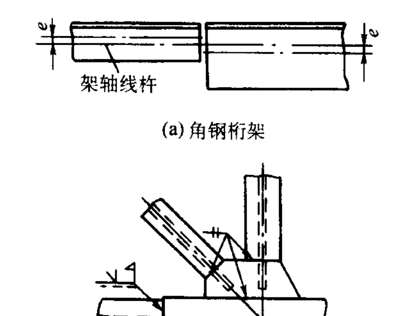


图 6.4-62 桁架弦杆变截面

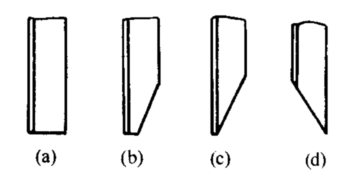


图 6.4-63 桁架杆件的切割

④ 采用节点板连接的桁架，节点板上腹杆与弦杆、腹杆与腹杆之间的间隙 c 应不小于 20 mm，并不宜大于 3.5 t，t 为节点板厚度。对直接承受动态载荷的桁架，间隙可适当放大，但不得超过 6 t 及 80 mm（图 6.4-64）。

⑤ 节点板的形状和平面尺寸应根据满足上条的间隙及腹杆与节点板连接焊缝长度要求确定，但要考虑施工误差，将平面尺寸适当放大。节点板宜采用矩形、梯形或平行四边形，即一般至少有两边平行。节点板边缘与腹杆杆轴夹角不应小于 15°（图 6.4-66）。直接承受动态载荷的重型桁架腹杆与节点板的连接处宜修成弧形边缘，以提高节点的疲劳强度图 6.4-64b）。

节点板的厚度，对单腹壁式桁架可根据腹杆的最大内力（对梯形和人字形桁架）或弦杆端节间内力（对三角形桁架），按表 6.4-45 选用；对双腹壁式桁架，可按上述杆件内力的一半查表 6.4-45 选用。

⑥ 当腹杆与节点板边缘夹角小于 30°、腹杆满应力情况下，或节点板厚度小于表 6.4-45 中数值时，应按下式计算节点板的强度：

$$\sigma=\frac{N}{l_0 t}\leqslant f \qquad (6.4\text{-}109)$$

式中，N 为腹杆轴心力；t 为节点板的厚度；l_0 为破坏面的折算长度（图 6.4-65），按式（6.4-10）计算。



$$l_0 = \frac{b_1}{\sqrt{1+2\cos^2\theta_1}} + \frac{b_2}{\sqrt{1+2\cos^2\theta_2}} + b_3 \quad (6.4\text{-}110)$$

式中，b_1、b_2 为杆件端部与节点板边缘的垂距；θ_1、θ_2 为 b_1、b_2 与杆件轴线夹角；b_3 为杆件端部的宽度；f 为节点板材料的强度设计值。

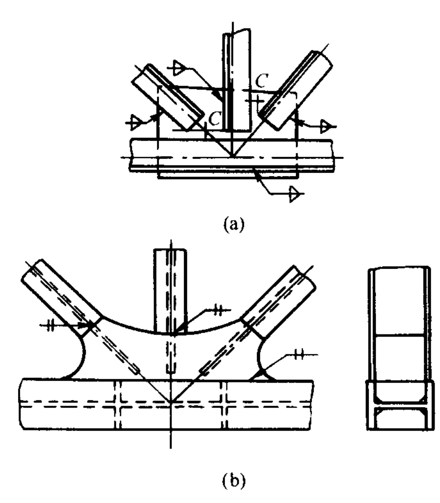


图 6.4-64　节点板的形状

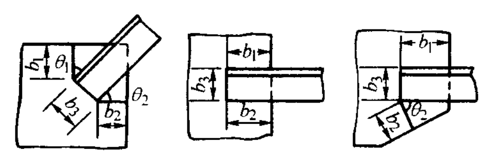


图 6.4-65　节点板破坏面的计算简图

⑦ 单腹杆与弦杆的连接应使之不出现连接的偏心弯矩（图 6.4-66)。在单腹杆的连接处应计算腹杆与弦杆之间节点板截面（图 6.4-66a）的 a—a 截面］的强度。

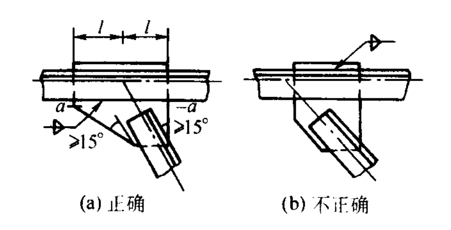


图 6.4-66　单斜腹杆的连接

(2) 型钢桁架节点的构造及其强度计算

各种型钢桁架节点构造如图 6.4-67 ~ 图 6.4-71 所示，它们的构造要点与连接强度计算列于表 6.4-46。

表 6.4-45　单腹壁式桁架节点板厚度选用表

梯形、人字形桁架腹杆最大内力或三角形桁架弦杆端节间内力/kN	≤180	181 ~ 300	301 ~ 500	501 ~ 700	701 ~ 950	951 ~ 1 200	1 201 ~ 1 550	1 551 ~ 2 000
中间节点板厚度/mm	6 ~ 8	8	10	12	14	16	18	20
支座节点板厚度/mm	8	10	12	14	16	18	20	24

注：节点板钢材为 Q345 或 Q390 钢材，节点板厚度可按表中数值适当减小。

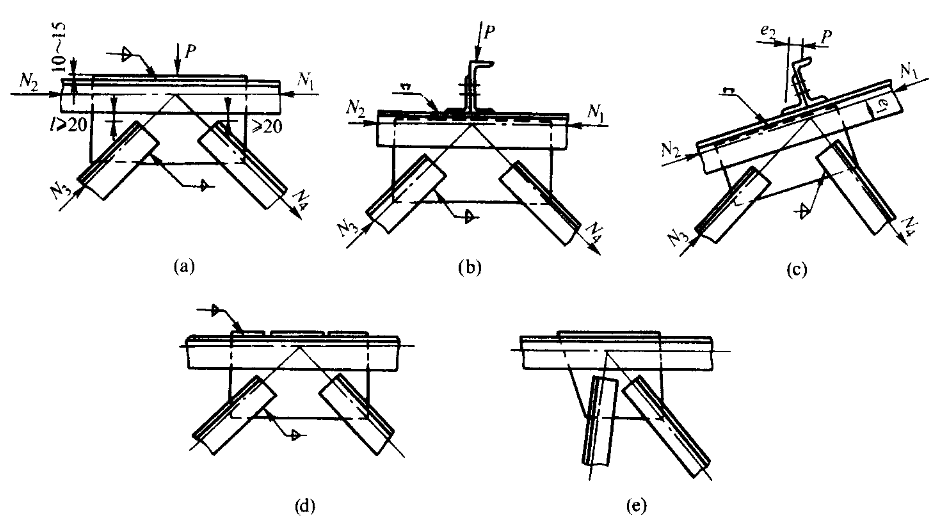


图 6.4-67　角钢桁架的上弦节点构造形式

3.3.2　钢管桁架节点

(1) 圆管桁架的节点构造与计算

弦杆（以下称主管）与腹杆（以下称支管）的连接宜采用直接焊接（也可采用节点板或将支管端打扁等形式，但其受力性能较差，这里不做介绍），节点处主管连续，支管焊于主管外壁上，不得将支管穿入主管。

主管的外径及壁厚均应大于支管的外径及壁厚。主管和支管或两支管轴线之间的夹角 θ 不宜小于 30°，以保证施焊条件，使焊缝焊透。

节点上支管与主管的轴线应尽量汇交于一点，但为避免支管在节点处的焊缝交叉而造成的支管偏心 e 不超过主管直径的 1/4 时，杆件计算可不计此偏心影响（图 6.4-72)。



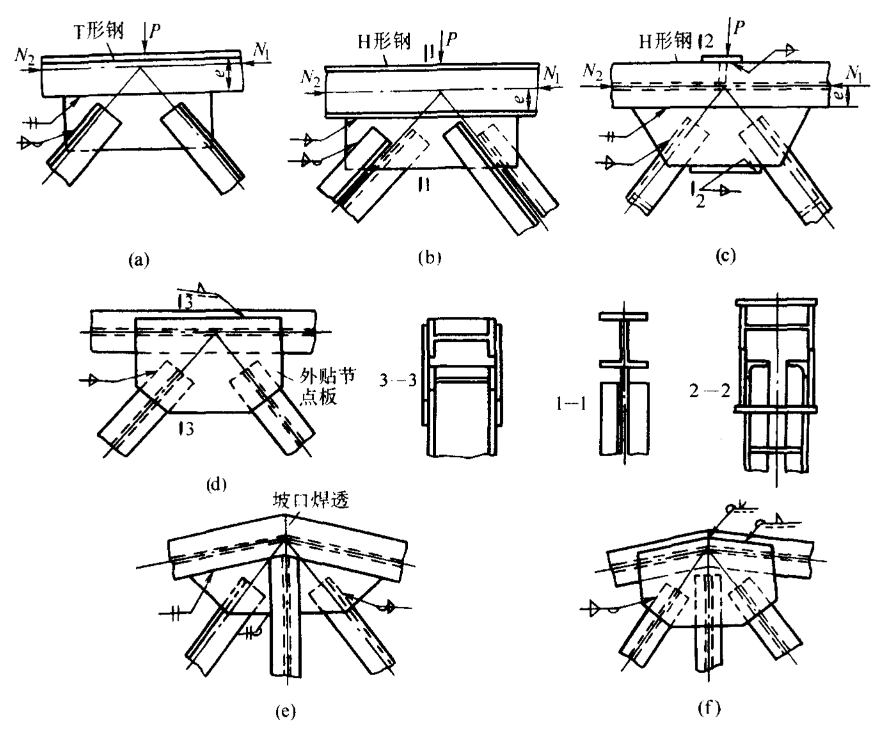


图 6.4-68 T 形、H 形钢桁架的上弦节点构造形式

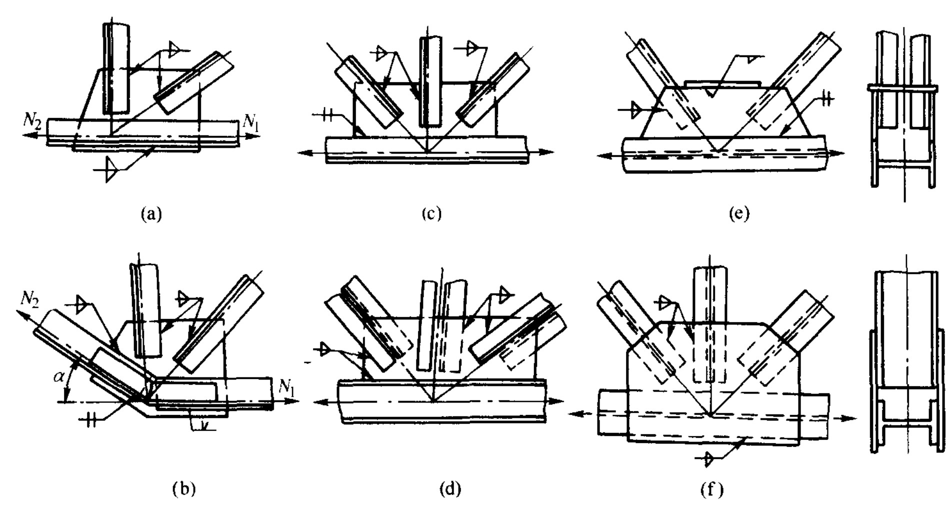


图 6.4-69 型钢桁架的下弦节点构造形式

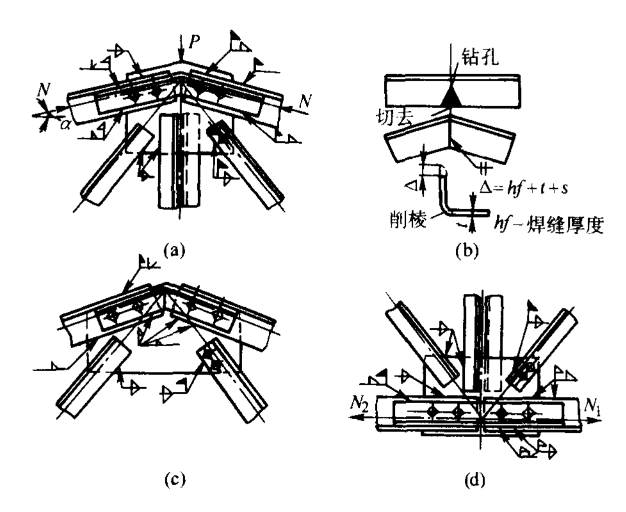


图 6.4-70 角钢桁架的拼接节点构造

支管端部宜使用自动切管机切割，支管壁厚小于 6 mm 时可不切坡口。

支管与主管的连接焊缝应沿全周连续焊接并平滑过渡。沿全周可采用角焊缝，也可部分采用角焊缝、部分采用对接焊缝，支管管壁与主管管壁的夹角大于或等于 120°的区域宜采用对接焊缝或带坡口的角焊缝，角焊缝的焊脚尺寸 h_f 不宜大于支管壁厚的两倍。

不论全周角焊缝，还是部分对接焊缝，焊缝强度均按本篇第 3 章 4.3 节的规定计算。

为保证节点处主管的强度，支管的轴心力不得大于下列规定中的承载力设计值。

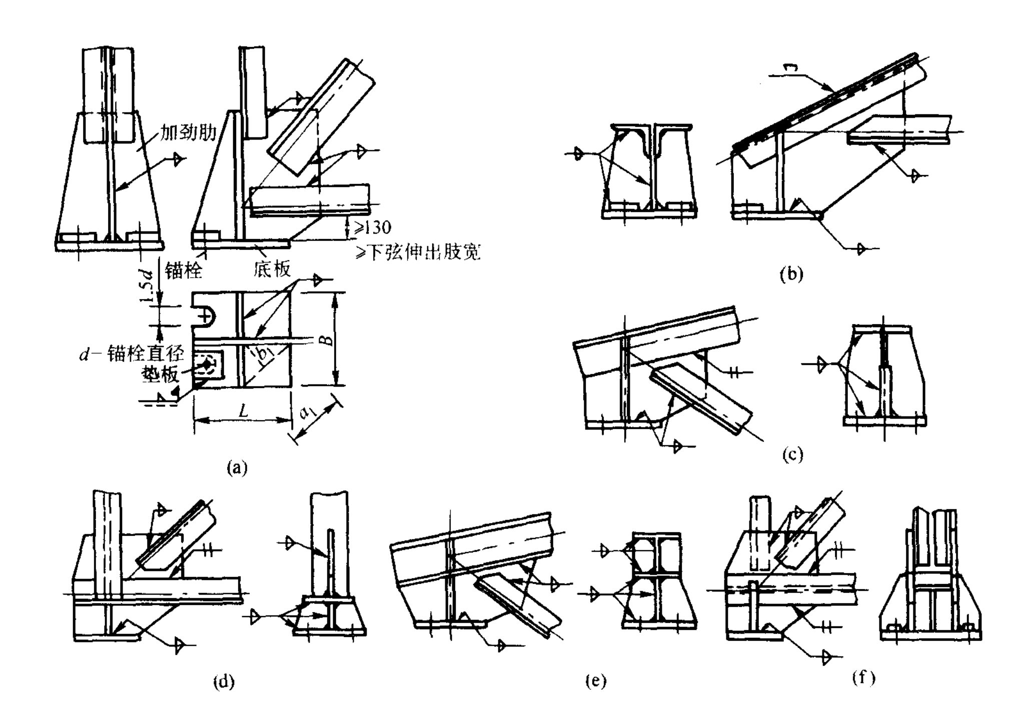


图 6.4-71 型钢桁架的支座节点构造形式

表 6.4-46 型钢桁架节点构造与计算

	构造要点	计算项目		计算公式
(1) 上弦节点（有集中载荷的弦杆节点）				
角钢桁架	1）当节点板伸出不妨碍屋面构件设置时，节点板宜向上伸出 10～15 mm（图 6.4-67a）	上弦角钢与节点板的连接焊缝强度	角钢肢背焊缝	$\sqrt{(\frac{\sigma_P}{1.22})^2+\tau_{\Delta N}^2}\leqslant f_f^w$ (6.4-111) $\sigma_P=\frac{0.5P}{1.4\,h_f l_w}$ (6.4-112) $\tau_{\Delta N}=\frac{k_1(N_1-N_2)}{1.4h_f l_w}$ (6.4-113)
			角钢肢尖焊缝	同式（6.4-111），但 $\tau_{\Delta N}=\frac{k_2(N_1-N_2)}{1.4\,h_f l_w}$ (6.4-114)
	2）当节点板伸出妨碍屋面构件设置时，节点板应缩进上弦角钢背（图 6.4-67b，c），缩进距离应大于 0.5 t + 2 mm，小于 t（t 为节点板厚度）		塞焊缝	$\frac{P}{1.4\,h_f l_w}\leqslant f_f^w$
			角钢肢尖焊缝	$\sqrt{(\frac{N_1-N_2}{1.4\,h_f l_w})^2+(\frac{6[(N_1-N_2)e_1+Pe_2]}{1.4\,h_f l_w^2})^2}\leqslant f_f^w$ (6.4-115)
T形、H形钢桁架	1）T形钢弦杆与节点板采用对接焊缝连接（图 6.4-68a）	T形钢弦杆与节点板连接的对接焊缝强度		$\sigma=\frac{P}{t_j l_w}\pm\frac{6(N_1-N_2)e}{t_j l_w^2}\leqslant f_t^w,\ f_c^w$ (6.4-116) $\tau=\frac{1.5(N_1-N_2)}{t_j l_w}\leqslant f_v^w$ (6.4-117) $\sigma_{eq}=\sqrt{(\frac{P}{t_j l_w})^2+3\tau^2}\leqslant -1.1\,f_f^w$ (6.4-118)



续表 6.4-46

构造要点		计算项目	计算公式
（1）上弦节点（有集中载荷的弦杆节点）			
T 形、H 形钢桁架	2）H 形钢弦杆与节点板采用角焊缝连接（图 6.4-68b）	H 形钢弦杆与节点板连接的角焊缝强度	同式（6.4-111），但式中 $\sigma_P = \frac{P}{1.4\ h_f l_w} + \frac{6\ (N_1 - N_2)\ e}{1.4\ h_f l_w^2}$　(6.4-119) $\tau_{\Delta N} = \frac{N_1 - N_2}{1.4\ h_f l_w}$　(6.4-120)
双腹壁 H 形钢桁架	1）H 形钢弦杆翼缘与节点板以对接焊缝相连（图 6.4-68c）	H 形钢弦杆翼缘与节点板连接的对接焊缝强度	同式（6.4-116）～式（6.4-118），但对接焊缝应取两根
双腹壁 H 形钢桁架	2）H 形钢弦杆以角焊缝与外贴节点板连接（图 6.4-68d）	H 形钢弦杆与外贴节点板连接的角焊缝强度	同式（6.4-111），但式中： $\sigma_P = \frac{P}{1.4\ h_f l_w}$，$\tau_{\Delta N} = \frac{(N_1 - N_2)}{1.4\ h_f l_w}$　(6.4-121)
（2）下弦节点（无集中载荷作用的弦杆节点）			
角钢桁架	1）节点板伸出角钢肢背 10～15 mm（图 6.4-70a） 2）对有弯折下弦的拐角节点加上连接角钢（连接角钢应按图 6.4-70b 要求钻孔、切肢、削棱后，弯合对接焊缝连接等加工），连接角钢截面不小于弦杆	一般下弦节点的弦杆与节点板的连接焊缝强度（可只计算角钢肢背焊缝）	$\frac{k_1\ (N_1 - N_2)}{1.4\ h_f l_w} \leqslant f_f^w$　(6.4-122)
		下弦弯折的拐角节点（图 6.4-69b）：连接角钢与弦杆的连接焊缝长度（接头一侧）	$l_w = \frac{N_{max}}{4 \times 0.7\ h_f f_f^w} + 10\ \text{mm}$　(6.4-123) N_{max}为节点上两弦杆轴心拉力的大值
		下弦弯折的拐角节点：连接角钢长度	$L = 2l_w + 15\ \text{mm}$，$L \geqslant 400\ \text{mm}$　(6.4-124)
		下弦弯折的拐角节点：下弦杆与节点板的连接焊缝强度	$\frac{\sqrt{\Delta N_2 + \ (N_2 \sin\alpha)^2}}{0.7\ h_f \sum l_w} \leqslant f_f^w$　(6.4-125) $\Delta N = N_2 \cos\alpha - N_1$　(6.4-126)
T 形、H 形钢桁架	同上弦节点，见图 6.4-69c～f	同上弦节点	同上弦节点，但取各式中 $P = 0$
（3）拼接节点			
	1）拼接节点设置位置应根据安装及运输条件确定，角钢及 T 形钢桁架一般设在节点上，H 形钢桁架弦杆拼接应设在节点之外以便于构造 2）角钢桁架的拼接节点上应加连接角钢连接弦杆以传递弦杆内力和提供节点的侧向刚度。拼接角钢要求按图 6.4-70b 要求钻孔、切肢、削棱、弯合焊接加工，其截面与弦杆相同	拼接角钢与弦杆的连接焊缝长度（图 6.4-70）	同式（6.4-123）
		拼接角钢长度（图 6.4-70）	同式（6.4-124） 并不小于 300～600 mm
		下弦拼接节点处下弦与节点板连接焊缝长度（只验算肢背焊缝）（图 6.4-70d）	$\frac{k_1 \times 0.15 N_1}{1.4 h_f l_w} \leqslant f_f^w$ 或 $\frac{k_1\ (N_1 - N_2)}{1.4 h_f l_w} \leqslant f_f^w$
		脊节点处上弦与节点板连接焊缝强度（图 6.4-70a）	$\frac{P - 2N_1 \sin\alpha}{8 \times 0.7 h_f l_w} \leqslant f_f^w$
（4）支座节点（支承在砼底座上的铰接支座）			
	1）支座构造见图 6.4-71，图 6.4-71a 为梯形角钢桁架的支座，b 为三角形角钢桁架的支座，c、d、e 为 T 形、H 形钢桁架支座，f 为 H 形钢双腹壁桁架的支座 2）加设底板，并在支座中心位置设置加强肋以加强底板抗弯刚度和增强支座节点的侧向刚度 3）设置锚栓并预埋于钢肋砼柱中，安装桁架时起定位作用，屋架就位调整后，再套上垫板与底板焊接，锚栓直径应≥20 mm 4）桁架下弦的底面与支座底板的距离不宜小于下弦型钢的伸出肢宽及 130 mm（图 6.4-71）	支座底板面积	$A_1 = B \cdot L \geqslant \frac{R}{f_{cc}} + A_0$　(6.4-127) B、L 均应≥200 mm
		底板厚度	$t \geqslant \sqrt{6\ M/f}$，≥14 mm　(6.4-128) $M = \beta q a_1^2$　(6.4-129) $q = \frac{R}{(A - A_0)}$，≥8 mm　(6.4-130)
		加强肋、节点板与底板的连接焊缝焊脚尺寸	$h_f = \frac{R}{1.22 \times 0.7 \sum l_w f_f^w}$　(6.4-131)



续表 6.4-46

构 造 要 点	计算项目	计 算 公 式
1）支座构造见图 6.4-71，图 6.4-71a 为梯形角钢桁架的支座，b 为三角形角钢桁架的支座，c、d、e 为 T 形、H 形钢桁架支座，f 为 H 形钢双腹壁桁架的支座 2）加设底板，并在支座中心位置设置加强肋以加强底板抗弯刚度和增强支座节点的侧向刚度 3）设置锚栓并预埋于钢肋砼柱中，安装桁架时起定位作用，屋架就位调整后，再套上垫板与底板焊接，锚栓直径应≥20 mm 4）桁架下弦的底面与支座底板的距离不宜小于下弦型钢的伸出肢宽及 130 mm（图 6.4-71）	加强肋与节点板的连接焊缝强度	$\sqrt{\left(\frac{V}{1.4h_f l_w}\right)^2+\left(\frac{6M}{1.4h_f l_w^2}\right)^2}\leqslant f_f^w$ (6.4-132) $V=R/4$ (6.4-133) $M=V\frac{B}{4}$ (6.4-134)

注：1. P 为作用于桁架节点上的集中载荷；h_f 为角焊缝焊脚尺寸；l_w 为焊缝的计算长度，角焊缝取实际焊缝长减10 mm，对接焊缝有引弧板时取焊缝实际长度，无引弧板时取实际长度减 10 mm；k_1、k_2 为角钢肢背、肢尖焊缝内力分配系数，按表 6.4-47 中取值；t_j 为节点板厚度（对接焊缝厚度）；R 为桁架的支座反力；A_0 为支座底板锚栓孔处的缺口总面积；t 为支座底板厚度；A_1、A 为支座底板计算要求和实际采用面积；β 为系数；f_t^w、f_c^w、f_v^w 为对接焊缝的抗拉强度、抗压强度、抗剪强度设计值；f_{cc} 为支座混凝土轴心抗压强度设计值；f_f^w 为角焊缝的强度设计值；f 为钢材的抗弯强度设计值；其他符号为见相应图号的图注。

2. 桁架腹杆连接表中未给出，因一般腹杆与节点板均以角焊缝连接，当腹杆采用角钢组成的 T 形截面时，焊缝强度按下式验算

$$\text{肢背焊缝：}\tau_f=\frac{k_1 N}{2\times0.7\,h_f l_w}\leqslant f_f^w \tag{6.4-135}$$

$$\text{肢尖焊缝：}\tau_f=\frac{k_2 N}{2\times0.7\,h_f l_w}\leqslant f_f^w \tag{6.4-136}$$

式中，N 为腹杆轴心力。

在双腹壁桁架中，腹杆为单角钢与节点板相连时（图 6.4-68c），仍按式（6.4-135）、式（6.4-136）计算，但式中 f_f^w 应乘以 0.85 系数。

表 6.4-47　角钢焊缝内力分配系数

项次	角钢类型	连接形式	分配系数 k_1	分配系数 k_2
1	等边角钢		0.7	0.3
2	不等边角钢短肢连接		0.75	0.25
3	不等边角钢长肢连接		0.65	0.35

① X形节点（图 6.4-73a）　受压支管在管节点处的承载力设计值应按下式计算：

$$N_c=\frac{5.45}{(1-0.81\beta)\sin\theta}\psi_n t^2 f \tag{6.4-137}$$

式中，$\beta=d_a/d$ 为支管外径与主管外径之比；ψ_n 为参数：当 $\sigma<0$ 时，$\psi_n=1+0.3\sigma/f_y-0.3\ (\sigma/f_y)^2$；当 $\sigma\geqslant0$ 时，$\psi_n=1$；t 为主管的壁厚；f 为钢材的抗拉强度、抗压强度和抗弯强度的设计值；σ 为主管最大轴向应力（拉应力为正，压应力为负）。

受拉支管在管节点处的承载力设计值应按下式计算：

$$N_t=1.5N_c \tag{6.4-138}$$

② T形和Y形节点（图 6.4-73b）　受压支管在管节点处的承载力设计值应按下式计算：

$$N_c=\frac{12.12}{\sin\theta}\left(\frac{d}{t}\right)^{0.2}\psi_n\psi_d t^2 f \tag{6.4-139}$$

式中，ψ_d 为参数；当 $\beta\leqslant0.7$ 时，$\psi_d=0.069+0.93\beta$；当 $\beta>0.7$ 时，$\psi_d=2\beta-0.68$。

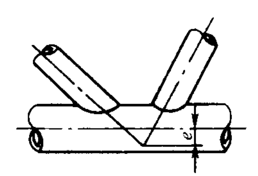


图 6.4-72　钢管桁架点节的偏心受力

受拉支管在管节点处的承载力设计值应按下列公式计算：

当 $\beta\leqslant0.6$ 时，$N_t=1.4N_c$　(6.4-140)

当 $\beta>0.6$ 时，$N_t=(2-\beta)\ N_c$　(6.4-141)

③ K形节点（图 6.4-73c）受压支管在管节点处的承载力设计值应按下式计算：

$$N_c=\frac{12.12}{\sin\theta_c}\left(\frac{d}{t}\right)^{0.2}\psi_n\psi_d\psi_a t^2 f \tag{6.4-142}$$

式中，θ_c 为受压支管轴线与主管轴线的夹角；ψ_a 为参数，按式（6.4-143）计算。

$$\psi_a=1+\left(\frac{2.19}{1+7.5\frac{a}{d}}\right)\left(1-\frac{20.1}{6.6+\frac{d}{t}}\right)(1-0.77\beta) \tag{6.4-143}$$

式中，a 为两支管间的间隙，当 $a<0$ 时，取 $a=0$。

受拉支管在管节点处的承载力设计值应按下式计算：

$$N_t = \frac{\sin\theta_c}{\sin\theta_t} N_c \qquad (6.4\text{-}144)$$

式中，θ_t 为受拉支管轴线与主管轴线的夹角。

上述 X 形及 K 形节点系指支管轴线与主管轴线在同一平面内，上列式（6.4-137～式 6.4-144）适用范围为：$0.2 \leqslant \beta \leqslant 1.0$，$d_s/t_s \leqslant 50$（$t_s$ 为支管壁厚），$\theta \geqslant 30°$，当 $d/t > 50$ 时，取 $d/t = 50$。

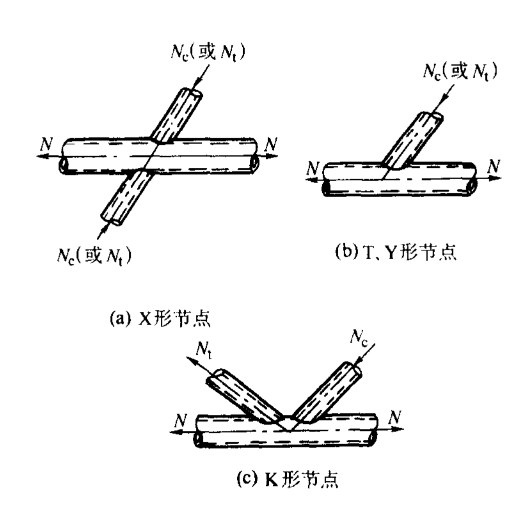


图 6.4-73　钢管节点形式

当节点上的两根腹杆彼此相交时（图 6.4-74a），宜将受拉腹杆沿全周焊于主管上，对受压的腹杆切角搭接在拉腹杆上并与主管及受拉腹杆焊连，这种做法对节点受力有利，但压腹杆端部加工复杂化，被压腹杆覆盖的部分受拉腹杆与主管的焊缝质量无法检查。

当按式（6.4-137）～式（6.4-144）计算节点承载力不能满足要求时，可采用在节点处加套管（图 6.4-74b）或局部采用厚管（图 6.4-74c）等方法加强。

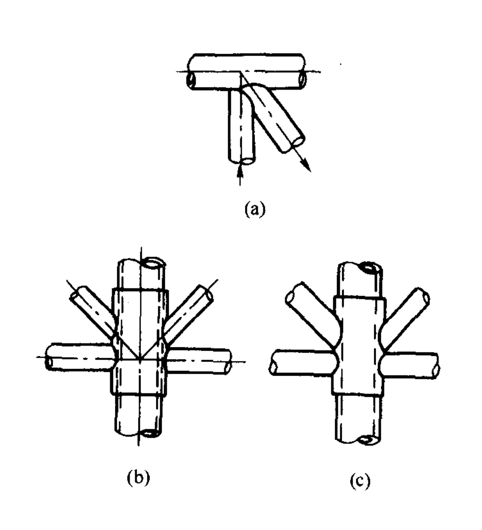


图 6.4-74　钢管桁架节点的补强

（2）方管节点的构造

为防止方管壁在节点处发生局部变形，当腹杆截面宽度小于弦杆截面宽度的 0.25 倍时，宜在节点处加设垫板（图 6.4-75a），其他情况可直接相焊（图 6.4-75b）。

当采用槽钢、角钢组合成闭口截面时，为防止节点处杆件发生局部变形，宜采用图 6.4-75c 所示的加强肋加强。

所有闭口截面的端部均应采用封板焊死，以防止管内锈蚀。

（3）空间管子桁架节点的构造

空间管子桁架如网架等立体结构中常采用空心球节点（图 6.4-76a）。这种节点构造合理，形式优美，受力明确，连接方便，便于备料和施焊。但要求被连接件的长度及其端部与球体连接的相贯线要非常精确。

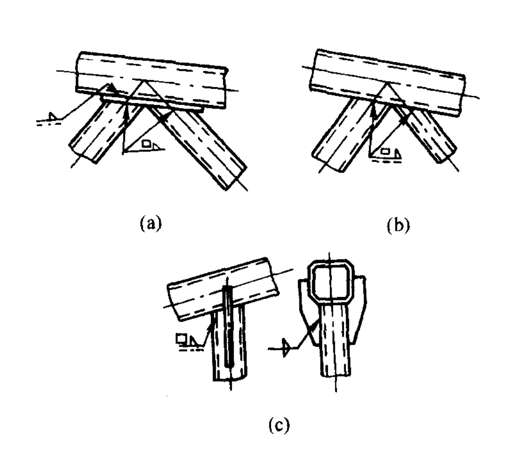


图 6.4-75　方管桁架节点的构造

空心球由两个压制的半球对焊而成。球体外径由构造要求决定，应使被连接件的边缘之间留有一定的距离（不小于 20 mm）。空心球的外径与壁厚的比值一般可选用 30～45。当球的外径和杆件内力较大时，可在球内设置环形肋（图 6.4-76b），肋板厚度应不小于球壁厚度。内力较大的杆件宜连接在环形肋的平面内。当杆件下料稍短，缝隙在 4～10 mm时，可在钢管内加一段衬管，再将缝隙填满（图 6.4-76c）。

空间管子桁架节点有时也采用其他立体形状的连接件。

3.4　焊接桁架结构设计实例

3.4.1　9 m 空间桁架式檩条的焊接结构（图 6.4-77）

檩条是架在屋架上面用来支承屋面板的长条形构件。有实腹式和桁架式两种，桁架式檩条适用于檩条跨度和檩距较大，屋面载荷较大的场合。

桁架式檩条又分平面桁架和空间桁架两大类。本例为空间桁架式檩条，是由角钢（∟ 45×4）和圆钢（ϕ20）组焊而成。其优点是结构设计合理，受力明确，整体刚度大，其侧向刚度比平面桁架好。但这类桁架制作较费工。

3.4.2　15 m 三角形薄壁方管屋架的焊接结构（图 6.4-78）

在工业与民用房屋建筑中，梁式桁架常作为屋架用于较大跨度建筑物的屋盖承重结构。屋架的外形分三角形、梯形、平行弦、人字形等形式。本例为三角形屋架，其弦杆、腹杆全部采用薄壁的方管，刚性好，具有良好的抗压和抗弯扭承载能力；由于采用方管，可以在节点处直接焊接，不需节点板，结构简单，省材料，截面有较大侧面刚度，有利于构件运输和安装，能降低其加工费用；由于杆件是封闭截面，其耐锈蚀性能好，省防锈涂料，便于维护；用钢量少、质量轻属轻钢结构；结构外形美观。但材料价格较高。

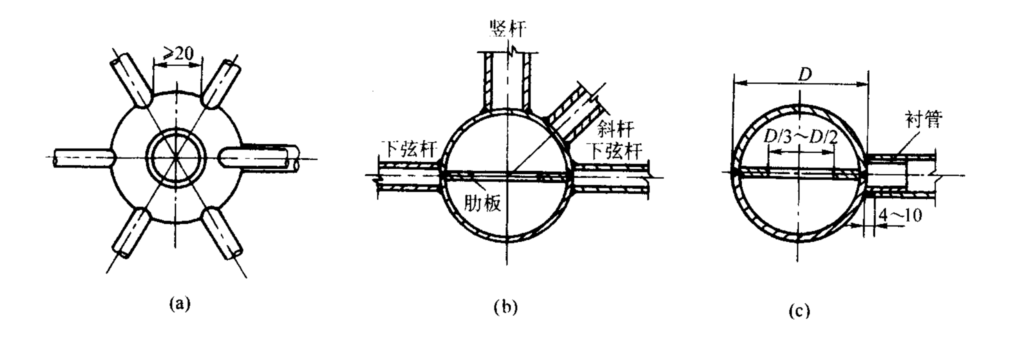


图 6.4-76 空心球节点焊接结构

图 6.4-77 9 m空间桁架式檩条焊接结构
（钢材 Q235—B·F，焊条 E4300～E4313 型；未注明的螺栓孔 $d=13$）

几何尺寸及内力(t)

1—1　　2—2　　3—3　　4—4

说明：
1. 钢材为Q235-B·F；
2. 未注明的板厚为3；
3. 未注明的焊缝厚度为2，满焊；
4. 未注明的螺栓孔为$\phi17$；
5. 屋架下弦跨中三个节点有悬挂载荷$Q=0.33\text{t}$。

图 6.4-78　15 m 三角形薄壁方管屋架焊接结构



4　焊接刚架

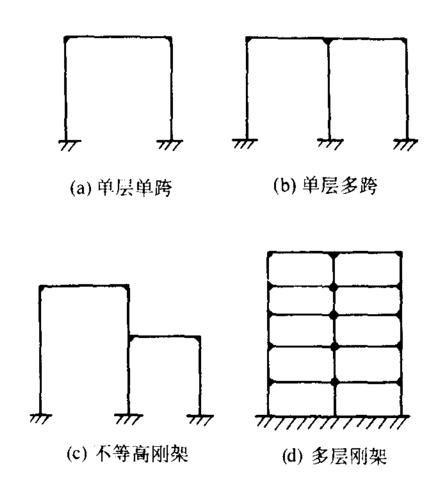
4.1　焊接刚架的一般特点

刚架是由直杆（梁和柱）相互刚性连接而成，并具有几何不变性的结构。刚架受载荷作用而变形后，各杆之间的夹角仍然保持不变。它的这种几何不变形性是依靠刚性节点的存在。刚性节点能承受和传递弯矩，可以削减结构中弯矩的峰值。

刚架各构件之间的连接若是采用焊接连接，则称为焊接刚架。

刚架有平面刚架和空间刚架，后者可看成是由前者组合而成。图 6.4-79 所示为平面刚架的结构简图。图中表示了刚架结构有单层和多层、单跨和多跨、等高和不等高之分。

由于刚架杆数少，内部空间较大，便于机件的安装和空间的利用。因此，焊接刚架在机械和建筑等部门应用广泛，图 6.4-80 所示为其应用实例。



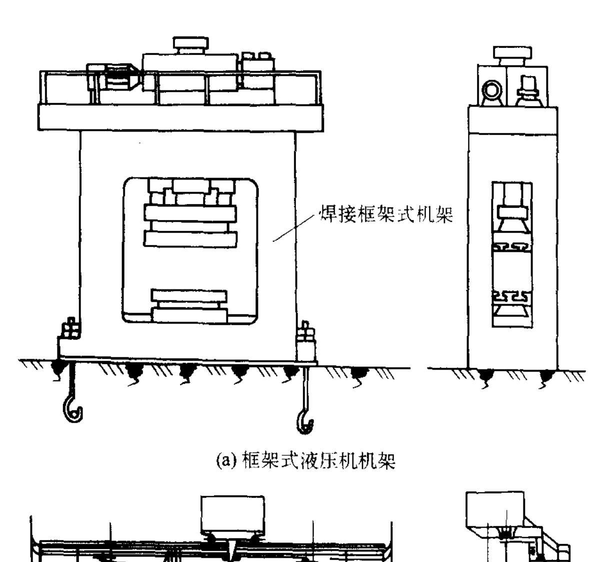
(a) 单层单跨　(b) 单层多跨　(c) 不等高刚架　(d) 多层刚架

图 6.4-79　焊接刚架结构简图

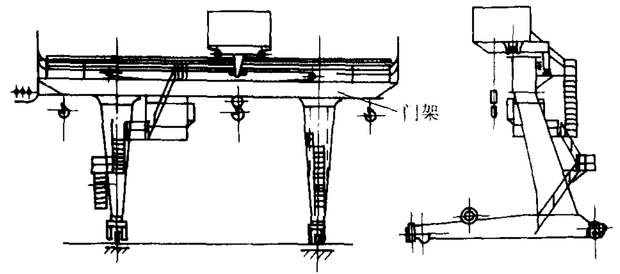
刚架的设计也和桁架设计一样，先计算出由载荷作用所产生的内力（弯矩、扭矩、轴力和剪力等），然后按内力和所选定的结构进行强度、刚度和稳定性验算。

刚架属杆系结构。对静定刚架结构，其内力和计算方法原则上与静定梁相同。通常是先由整体或某些部分的静力平衡条件，求出各支座反力及各节点处的内力，然后再逐杆计算其内力并绘制内力图。

对超静定刚架结构的支座反力和内力不能单靠静力平衡条件求得，通常是采用力法或位移法进行分析和计算。典型受载平面刚架的内力计算公式在一般工程力学手册都能查到，表 6.4-48 列出有代表性的几种。



(a) 框架式液压机机架



(b) 单主梁门式起重机

(c) 重型厂房横向框架

图 6.4-80　焊接刚架的应用实例

表 6.4-48　超静定刚架简单受载下的内力（弯矩 M）计算公式

项目	几何尺寸与系数	载荷图及 M 图	在特定截面内的弯矩 M
Γ形刚架内的弯矩	横梁和立柱铰支 $k=\frac{J_2 h}{J_1 l}$ $n=1+k$		$M_B=\frac{\alpha}{2}\frac{(1+\alpha)}{n}aP$ $M_P=\alpha\left[1-\frac{\alpha}{2}\frac{(1+\alpha)}{n}\right]aP$　$\alpha=\frac{b}{l}$
			$M_B=\frac{ql^2}{8n}$



续表 6.4-48

项目	几何尺寸与系数	载荷图及 M 图	在特定截面内的弯矩 M
Γ形刚架内的弯矩	横梁和立柱铰支 $k=\frac{J_2h}{J_1l}$ $n=1+k$		$M_B=\frac{\alpha(2-\alpha)kb}{2n}P$ $\alpha=\frac{a}{h}$
	固定的横杆和竖杆 $k=\frac{J_2h}{J_1l}$ $n=1+k$		$M_A=\frac{\alpha^2a}{2n}P$;　$M_B=\frac{\alpha^2a}{n}P$ $M_C=[(2-\alpha)k+2(1-\alpha)]\frac{\alpha a}{2n}P$ $M_P=\alpha aP-\alpha M_B-(1-\alpha)M_c$;　$\alpha=\frac{b}{l}$
			$M_A=\frac{ql^2}{24n}$;　$M_B=\frac{ql^2}{12n}$ $M_C=(2+3k)\frac{ql^2}{24n}$
			$M_A=[1+\alpha(1+2k)]\frac{\alpha b}{2n}P$ $M_B=\frac{\alpha k(1-\alpha)b}{n}P$ $M_C=\frac{\alpha k(1-\alpha)b}{2n}P$; $\alpha=\frac{a}{h}$
∏形刚架内的弯矩	铰支竖杆 $k=\frac{J_2h}{J_1l}$ $n=3+2k$		$M_B=M_C=\frac{3ab}{2nl}P$ $M_P=\frac{(3+4k)ab}{2nl}P$
			$M_B=M_C=\frac{1}{2}hP$
			$M_B=M_C=\frac{ql^2}{4n}$ $M_{max}=(1+2k)\frac{ql^2}{8n}$



续表 6.4-48

项目	几何尺寸与系数	载荷图及 M 图	在特定截面内的弯矩 M
门形刚架内的弯矩	竖杆为固定端 $k=\frac{J_2h}{J_1l}$ $n_1=2+k$ $n_2=1+6k$		$M_A=\left(\frac{1}{2n_1}-\frac{2\alpha-1}{2n_2}\right)\alpha aP$ $M_B=\left(\frac{1}{n_1}+\frac{2\alpha-1}{2n_2}\right)\alpha aP$ $M_C=\left(\frac{1}{n_1}-\frac{2\alpha-1}{2n_2}\right)\alpha aP$ $M_D=\left(\frac{1}{2n_1}+\frac{2\alpha-1}{2n_2}\right)\alpha aP$ $\alpha=\frac{b}{l}$
			$M_A=M_D=\frac{1+3k}{2n_2}hP$ $M_B=M_C=\frac{3}{2}\frac{k}{n_2}hP$
			$M_A=M_D=\frac{ql^2}{12n_1}$ $M_B=M_C=\frac{ql^2}{6n_1}$ $M_{max}=\frac{2+3k}{24n_1}ql^2$
		载荷图	刚架结点处的弯矩（正弯矩使刚架内侧受拉伸）
封闭刚架内的弯矩	$k=\frac{J_2h}{J_1l}$ $p=\frac{J_2}{J_3}$ $n=1+p+6k$ $m=(2+k)+\frac{p}{k}(3+2k)$		$M_{A,D}=\alpha(1-\alpha)\left(\frac{1}{m}\mp\frac{1-2\alpha}{n}\right)\frac{Pl}{2}$; $M_{B,C}=-\alpha(1-\alpha)\left(\frac{2k+3p}{hm}\pm\frac{1-2\alpha}{n}\right)\frac{Pl}{2}$ $\alpha=\frac{a}{l}$
			$M_{A,D}=\alpha(1-\alpha)p\left(\frac{3+2k}{hm}\pm\frac{1-2\alpha}{n}\right)\frac{Pl}{2}$; $M_{B,C}=-\alpha(1-\alpha)p\left(\frac{1}{m}\mp\frac{1-2\alpha}{n}\right)\frac{Pl}{2}$; $\alpha=\frac{a}{l}$
			$M_{A,D}=\alpha\left\{\frac{1-\alpha}{m}[\alpha(1+k)-(2+k)]\right.$ $\left.\mp\frac{1}{n}[1+3k(2-\alpha)]\right\}\frac{Ph}{2}$ $M_{B,C}=\alpha\left\{-\frac{1-\alpha}{m}[\alpha(k+p)+p]\right.$ $\left.\pm\frac{1}{n}(3\alpha k+p)\right\}\frac{Ph}{2}$ $\alpha=\frac{a}{h}$
			$M_A=M_D=\frac{ql^2}{12m}$; $M_B=M_C=-\frac{ql^2}{12}\cdot\frac{2k+3p}{km}$;



续表 6.4-48

项目	几何尺寸与系数	载荷图及 M 图	刚架结点处的弯矩（正弯矩使刚架内侧受拉伸）
封闭刚架内的弯矩	$k=\frac{J_2 h}{J_1 l}$ $p=\frac{J_2}{J_3}$ $n=1+p+6k$ $m=(2+k)+\frac{p}{k}(3+2k)$		$M_A=M_D=\frac{3+2k}{hm}p\frac{ql^2}{12}$; $M_B=M_C=-\frac{p}{m}\cdot\frac{ql^2}{12}$
			$M_A=M_B=M_C=M_D$ $=\frac{1+k\frac{h^2}{l^2}}{1+k}\cdot\frac{ql^2}{12}$ 当 $J_2=J_3$ 时
	$K=\frac{J_2}{J_1}\cdot\frac{b}{l}$		$M_A=M_C=\frac{ql^2}{8}-M_E$ $M_B=M_D=\frac{qb^2}{8}-M_E$ $M_E=-\frac{q}{12}\cdot\frac{l^2+b^2k}{k+1}$

从图 6.4-80 中看出机械设备的机架和起重机的金属刚架等都属于简单的刚架，而工业厂房与民用建筑结构中的焊接刚架有多跨的和高低跨的不同布置，且横梁和柱等杆件通常是变截面的，其计算和构造都比较复杂。本节仅以建筑结构中的门式刚架为例，介绍焊接刚架的一般设计和计算方法。

4.2　门式焊接刚架结构的设计与计算

4.2.1　门式刚架的结构形式及其特点

在建筑钢结构中的门式刚架多为轻钢结构，其梁、柱等多为薄壁杆件。横梁与柱或柱与屋架的连接节点部分或全部采用刚性连接。在单层工业与民用钢结构中，应用较多的是单层单跨、双跨或多跨的双坡山形门刚架，如图 6.4-81 所示。它可根据通风、采光的需要设置天窗、通风屋脊和采光带等。

山形门式刚架屋面的坡度根据屋面材料和排水要求而定，通常为 1/3。若用压型钢板（或压型铝板）时可为 1/10 ~ 1/20。

和一般屋架结构相比，山形门式刚架的整个结构构件的横截面尺寸较小，可以有效地利用建筑空间，可降低房屋高度；减小建筑体积；在建筑造型上较简洁美观。其次，刚架构件的刚度较好，制造简单，便于运输和安装。这类门式刚架多用于中小跨度的工业厂房，仓库或较大跨度的公共建筑，其最大跨度可达 80 ~ 100 m。

门式刚架的结构形式较多。按结构体系分有实腹式与格构式两种；按横截面组成分有等截面与变截面两种。实腹式刚架可以采用焊接的工字形截面和两个卷边槽钢组成的工字形截面等形式。格构式刚架的横截面一般为矩形或三角形（见图 6.4-82）。

（1）实腹门式刚架

轻型实腹门式刚架适用于载荷较小，跨度为 9 ~ 18 m、柱距为 6 m、柱高为 4.5 ~ 9 m，无吊车的建筑物；当跨度不超过 15 m，柱高不超过 6 m 时，宜采用等截面形式，当跨度大于 15 m，柱高超过 6 m 时，宜采用变截面形式。变截面刚架能节约材料，但在结构连接及加工制造方面不如等截面的方便。

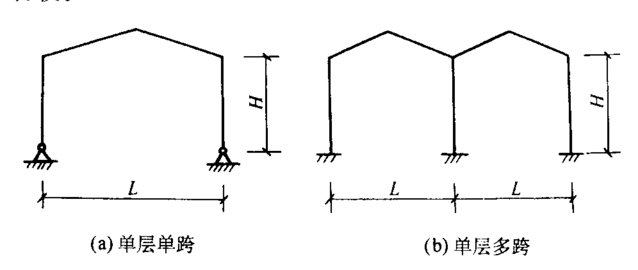


图 6.4-81　山形门式刚架简图

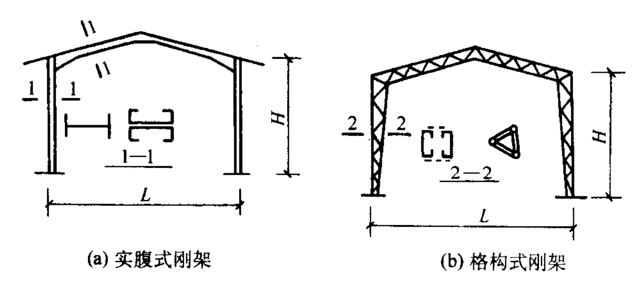


图 6.4-82　门式刚架的结构形式及横截面图

在实际工程中，实腹式门刚架应用最多的是工字形截面，因其截面形式简单，适应性强。可根据设计需要选用轧制工字钢、H 型钢或由三块钢板组焊而成的工字形组合截面。后者设计自由度大，比型钢节省材料。也有采用 Z 形截面的实腹刚架，其截面是采用钢板冷加工弯曲成形，它的优点是可定型化生产，比焊接工字形截面的焊接拼装工作量小、运输方便。但因其截面不对称，翼缘板与腹板等厚，受



力性能不如工字形好，故应用不多。

(2) 格构式刚架

一般用于载荷、跨度、柱高均较大的建筑物，例如跨度大于 18 m，柱高在 7 m 以上，柱跨为 6 m 或大于 6 m 以及有吊车的房屋。这类刚架选材和截面组成比较灵活，组成形式可以因材制宜，多样化。当刚架内力较小时，宜采用等截面，其截面为单腹杆或双腹杆的矩形及三腹杆的三角形，材料可采用普通角钢、槽钢以及薄壁槽钢、薄壁钢管等。当刚架内力较大时，宜用变截面，其截面为双腹杆的矩形及三腹杆的三角形，材料可用普通角钢、槽钢以及无缝钢管等。用钢管的三角形截面，构造简单，造型美观，制造方便，较适用于体育馆、展览馆等公共建筑物。对于跨度较大的门式格构刚架或采用折线形或弧形的横梁，以减少刚架矢高，降低建筑高度，改善建筑造型。

刚架结构形式多样，各有特点。格构式与实腹式相比较，变截面与等截面相比较，都是前者节省材料，但制造、运输和安装都不如后者方便。设计时需根据具体情况合理选择。

4.2.2　刚架的设计与计算

设计的一般过程是先选定刚架的几何形状和尺寸，再计算载荷，然后进行内力分析求内力；根据内力进行构件的截面选择并进行强度、稳定性和刚度验算，最后是构造和连接的设计与计算。下面介绍设计中的要点。

(1) 刚架的载荷

刚架上的载荷有恒载（包括屋面载荷及刚架支撑的自重)、活载荷（雪载荷或施工载荷）同时尚需考虑风载和围护墙及架质量。载荷的组合按以下三种情况考虑。

① 1.2 恒载标准值 + 1.4 活载标准值。

② 1.2 恒载标准值 + 1.4 风载标准值。

③ 1.2 恒载标准值 + 0.85（1.4 活载标准值 + 1.4 风载标准值)。

(2) 刚架的截面尺寸

刚架的截面高度与其跨度之比 h/L：

实腹式横梁宜采用 1/45 ~ 1/30；

格构式横梁宜采用 1/25 ~ 1/15。

刚架柱的截面高度，应根据柱高和吊车情况，并参照横梁的截面高度选用，或与横梁等截面或不等截面。当刚架的跨度大于或等于 15 m 时，其横梁宜起拱，拱度可取跨度的 1/500。

(3) 刚架的设计方法

刚架设计可采用弹性设计法，也可采用塑性设计法。前者既适用于等截面或变截面实腹式门式刚架，又适用于格构式门式刚架；后者只适用于等截面实腹式门式刚架。

对于冷弯薄壁型钢门式刚架，因《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002) 是以构件边缘纤维最大压应力达到钢材屈服点作为临界状态，没有考虑塑性发展的影响，所以门式刚架一般按弹性设计法。

1) 杆件的计算长度　验算杆件稳定性时需确定其计算长度。刚架柱平面内的计算长度 H_0 应按下式计算：

$$H_0 = \mu H \tag{6.4-145}$$

式中，H 为柱的高度，从基础顶面到柱与横梁轴线交点的距离；μ 为刚架柱的计算长度系数，按表 6.4-49 或表 6.4-50 采用。

表 6.4-49　等截面刚架柱的计算长度系数 μ

K_2/K_1		0	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	7.0	≥10.0
柱与基础的连接方式	刚接	2.0	1.5	1.4	1.28	1.16	1.08	1.06	1.04	1.02	1.00
	铰接	8	3.42	3.00	2.63	2.33	2.17	2.11	2.08	2.03	2.00

注：当横梁与柱铰接时，μ 取 $K_2/K_1 = 0$ 栏内的数值。

实腹式刚架柱或横梁平面外的长度，应取侧向支点的距离。当柱（或横梁）的内肢和外肢侧向支承点间的距离不等时，应取最大受压肢侧向支承点间的距离。

表 6.4-50　变截面刚架柱的计算长度系数 μ

（柱与基础的连接方式为铰接）

K_2/K_1		0.1	0.2	0.3	0.5	0.75	1.0	2.0	≥10.0
I_0/I_1	0.01	5.03	4.33	4.10	3.89	3.77	3.74	3.70	3.65
	0.05	4.90	3.98	3.65	3.39	3.25	3.19	3.10	3.05
	0.10	4.66	3.82	3.48	3.19	3.04	2.98	2.94	2.75
	0.15	4.61	3.75	3.37	3.10	2.93	2.85	2.72	2.65
	0.20	4.59	3.67	3.30	3.00	2.84	2.75	2.63	2.55

注：$K_1 = I_1/H$；$K_2 = I_2/l$；

I_1、I_0 是柱顶和柱脚处的截面惯性矩；

H 是刚架柱的高度；

I_2 是横梁的截面惯性矩；

l 是横梁的长度，在门式刚架中为刚架跨度，在山形门式刚架中为横梁沿折线的总长度。

格构式刚架柱或横梁的弦杆、腹杆和缀条等单个构件的计算长度 l_0 应按下列规定采用：

当内力均为压力时，

$$l_0 = \left(0.75 + 0.25\frac{N_2}{N_1}\right) l$$

且

$$l_0 \geqslant 0.5l \tag{6.4-146}$$

式中，l 为侧向支承点间的距离；N_1 为取最大的压力；N_2 为取最小的压力。

当内力在侧向支承点间的几个节间内为压力，而另几个节间内为拉力时，应按下式计算：

$$l_0 = \left(1.5 + 0.5\frac{\overline{N_t}}{\overline{N_c}}\right)\frac{n_c}{n} l \leqslant l \tag{6.4-147}$$

式中，$\overline{N_t}$ 为所有拉力的平均值，计算时取负值；$\overline{N_c}$ 为所有压力的平均值，计算时取正值；n 为两侧向支承点间节间总数；n_c 为内力为压力的节间数。

2) 杆件截面的计算　刚架横梁与实腹式刚架柱的强度和稳定性应按压弯构件进行验算。

强度验算用下列公式：

正应力

$$\sigma = \frac{N}{A_{efn}} \pm \frac{M_x}{W_{efnx}} \pm \frac{M_y}{W_{efny}} \leqslant f \tag{6.4-148}$$

剪应力

$$\tau = \frac{3V_{max}}{2h_0 t} \leqslant f_v \tag{6.4-149}$$

稳定性验算用下列公式：

弯矩作用平面内

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_x A_{ef}} + \frac{\beta_m M_x}{\left(1 - \frac{N}{N_{EX}}\varphi_x\right) W_{efx}} \leqslant f \tag{6.4-150}$$

弯矩作用平面外

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_y A_{ef}} + \frac{M_x}{\varphi_b W_{efx}} \leqslant f \tag{6.4-151}$$

式中，A_{efn} 为构件有效净截面面积；A_{ef} 为构件有效截面面积；W_{efnx}、W_{efny} 为对主轴 X 和 Y 的有效净截抵抗矩；W_{efx}、W_{efy} 为对主轴 X 和 Y 的有效截抵抗矩；N 为构件的轴力；N_{EX} 为欧拉临界力，$N_{EX} = \frac{\pi^2 EA_{ef}}{\lambda^2}$；$E$ 为钢材的弹性模量；λ

为构件在弯矩作用平面内的长细比；V_{max} 为受弯构件的最大剪力；h_0 为腹板计算高度；t 为腹板厚度之和；M_x、M_y 为对主轴 X 和 Y 的弯矩；f、f_v 为分别为钢材的抗拉强度和抗剪强度设计值；φ_x、φ_y 为轴心受压构件的稳定系数，参照本章 2.2.2 确定；φ_b 为受弯构件整体稳定系数，参照本章 1.3.2 确定；β_m 为等效弯矩系数，按下列规定采用。

① 当构件端部无侧移且无中间横向载荷时

$$\beta_m = 0.6 + 0.4\frac{M_1}{M_2} \geqslant 0.4 \qquad (6.4\text{-}152)$$

式中，M_1、M_2 分别为绝对值较小和绝对值较大的端弯矩，当构件以单曲率弯曲时，$\frac{M_1}{M_2}$ 取正值，当构件以双曲率弯曲时，$\frac{M_1}{M_2}$ 取负值；

② 构件端部无侧移但有中间横向载荷时，$\beta_m = 1.0$；

③ 构件端部有侧移时，$\beta_m = 1.0$。

格构式刚架柱按压弯构件计算强度和弯矩作用平面内的稳定性，平面外稳定由其单肢稳定控制。

格构式刚架横梁和柱的弦杆，腹杆和缀条等应分别按轴心受拉及轴心受压构件计算各个杆件强度和稳定性。

变截面刚架柱的稳定性或按弯矩最大的截面进行计算，此时，轴心力应取与最大弯矩同一截面的轴心力。

为了保证刚架有足够的刚度及屋面、墙面等的正常使用，刚架横梁的允许挠度和柱顶水平允许位移或按下列数值规定采用：

横梁的允许挠度　$\frac{l}{500}$

柱顶水平允许位移　$\frac{H}{500}$

式中，l、H 分别为刚架的跨度和柱的高度。

4.2.3　焊接刚架节点的结构设计

（1）单层刚架节点

图 6.4-83 为门式刚架梁柱节点的典型结构。图 6.4-83a ~ g 是工字形构件的刚架节点。图 6.4-83a 构造最简单。当柱腹板的抗剪强度不足时，可在腹板上设置肋板，以承受斜向力的作用并增强局部稳定性（图 6.4-83b）。图 6.4-83c 中的腋板用于增强节点刚性和抗剪能力。加大连接处梁腹板的高度可减少弯曲应力（图 6.4-83d）。将梁和柱的焊接点移至远离转角处的梁或柱上，可大大改善接头中的应力状态（图 6.4-83e）。在转角处设置肋板可提高刚性，防止受压翼缘变形失稳（图 6.4-83f、g）。图 6.4-83g 的设计效果比图 6.4-83f 的好。

图 6.4-83h 是箱形构件刚架节点。把对接缝布置在过渡圆弧之外，焊缝的受力较小。

图 6.4-83i 是钢板和型钢焊接的刚架节点。把钢板箱形梁的下翼缘以圆弧延伸过渡，再与型钢柱焊接，制造方便，过渡平缓。

图 6.4-83j 是用型钢焊成的刚架节点，在该处另外焊上具有过渡圆弧的连接钢板，既增加节点刚性，又减少应力集中。

图 6.4-84 为山形门架梁柱节点。图 6.4-84a ~ d 为实腹式刚架节点；图 6.4-84e、f 为轻型格构式刚架节点。后者设置有填板，并沿压内力方向用肋板加固，可承受较大内力；图 6.4-84g 为多跨山形门架的中间节点构造。

（2）多层刚架节点

图 6.4-85 为多层框架或高低跨刚架中常见的梁柱节点构造。梁与柱可以通过钢板或角钢连接（图 6.4-85a ~ e），也可以直接连接（图 6.4-85f ~ j）。为了提高节点的刚性。宜在柱身截面内与上下连接板或梁的上下翼缘的对应处设置横向肋板。

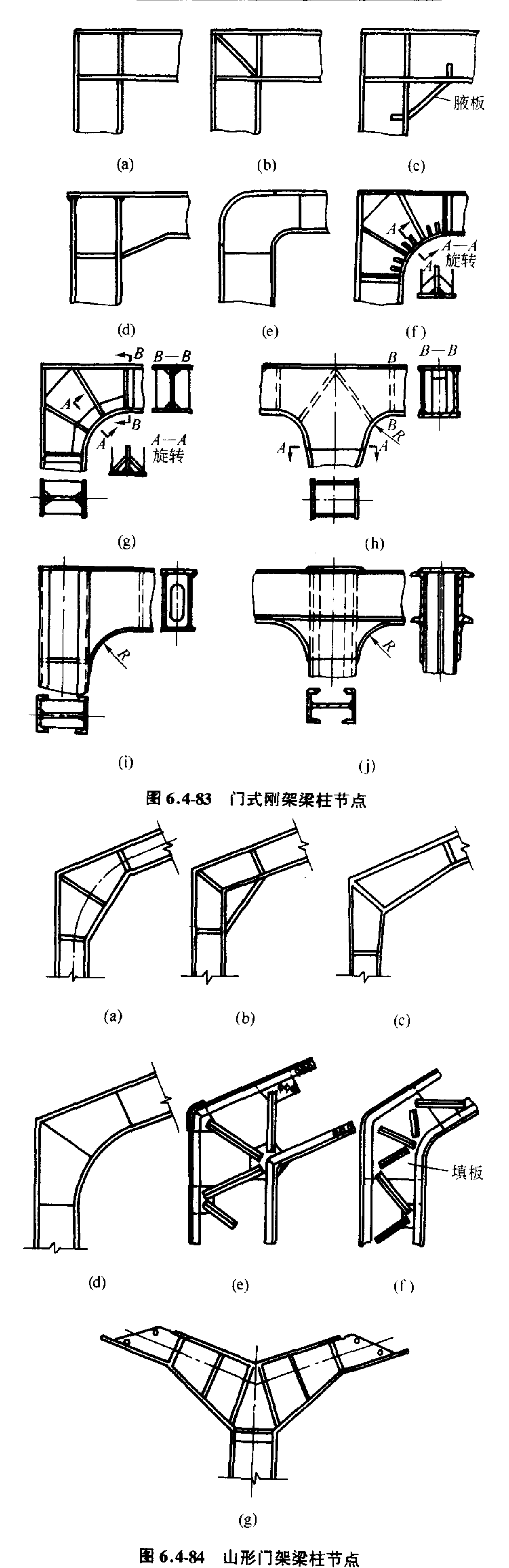


图 6.4-83　门式刚架梁柱节点

图 6.4-84　山形门架梁柱节点



在上下连接板上增设竖向肋板可增加焊缝长度以满足强度要求，同时也加强了节点刚度（图 6.4-85a、b）。在上连接板上开槽并与梁的上翼缘焊接也可增加焊缝长度（图 6.4-85c、d、e），槽宽以及槽口至板边的距离不宜小于 50 mm。当节点区柱腹板的厚度不能满足要求时，可在柱内设置斜向肋板以承担部分剪力（图 6.4-85c、g）。在连接处加肘板可减少弯曲应力（图 6.4-85h、i）。图 6.4-85j 构造可改善接头中的应力状态。图 6.4-85k 为焊缝与高强螺栓合用的构造，柱与梁的腹板先用高强螺栓连接，再把梁的上下翼缘用 V 形坡口焊缝与柱焊接（用托板防止烧穿）。

4.2.4 焊接刚架结构实例

（1）18 m门式实腹刚架（图 6.4-86）

该刚架为单层单跨厂房的门式刚架。其结构特点是：柱脚与基础为铰接；梁和柱均采用实腹变截面的工字形结构；在梁、柱汇交的节点处采用直线加腋，屋脊处也采用加腋结构，结构受力合理；腋端处和中部设有加强肋，以保证加腋部分的稳定，防止侧向压曲。加腋后使节点有足够的强度和刚性。梁、柱之间采用加腋端板用螺栓连接的结构，安装和拆除很方便。

（2）29 m门式格构刚架（图 6.4-87）

图 6.4-87 所示是某展览馆用的单层单跨门式格构刚架。其结构特点是：跨度大，采用的是折曲线管子空间桁架结构；由三根两种直径钢管组成三角形横截面，支柱为变截面管子桁架结构，梁的折线段为平行弦管子桁架结构，具有较好的抗弯刚度和抗扭刚度；无装卸连接接头，为全焊结构；梁柱汇交节点的结构很关键，外侧用钢板节点结构（见图中③放大），内侧用圆筒节点结构（见图中②放大）；整个桁架无节点板，简洁美观；全部采用薄壁圆管，质量轻，由于管子密封，耐锈性能好，外面刷漆防锈省事、维护方便。但这种刚架造价较高。

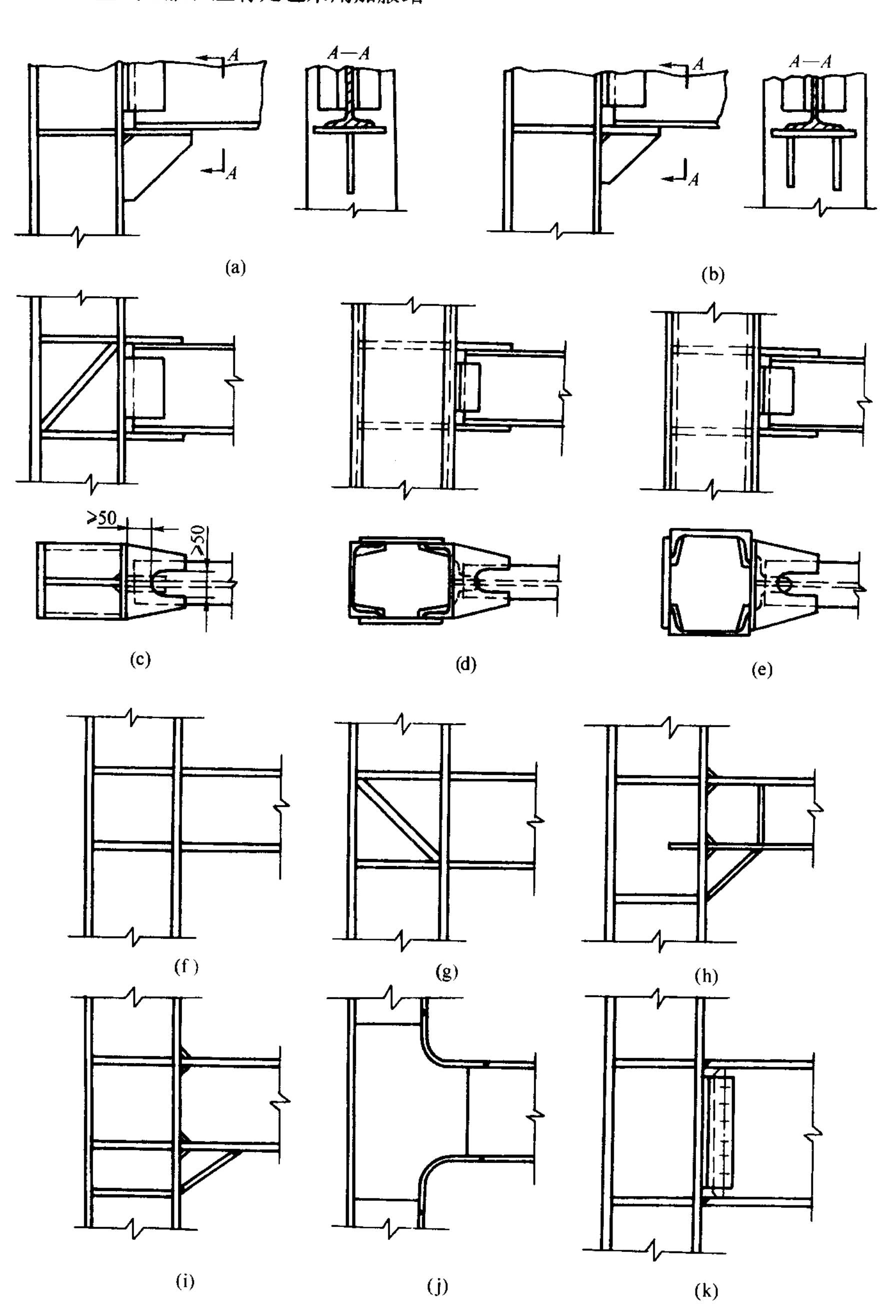
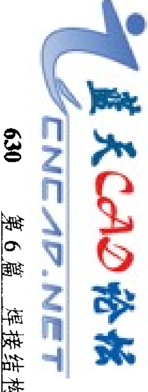


图 6.4-85 多层刚架梁柱节点



说明：1. 钢材为Q235 B·F；
2. 未注明的板厚为8；
3. 未注明的焊缝厚度为6；
4. 未注明的螺栓孔为$\phi 17$，螺栓为M16。

图 6.4-86　18 m 门式实腹刚架焊接结构



几何尺寸图

说明：1. 钢材为16Mn；
2. 未注明的板厚为6；
3. 未注明的焊缝厚度为较薄钢管厚度的1.5倍。

图6.4-87 29 m门式格构刚架的焊接结构

编写：陈祝军（山东大学）



第 5 章　机体的焊接结构

1　概述

机体是机器中的主体（或骨干）零件，它支承和容纳机器上的各种零部件，这些零部件在机体上或者固定不动，或者绕轴线转动（或摆动），或者沿导轨作往返移动。

机体有整体式和组合式两类。整体式机体多为矩形截面的六面体结构，常称为箱体。其刚性好，但只适于作中、小型机器的机体，如机械传动中的减速器箱体。组合式机体多用于大型机器中，是从制造条件、运输条件、设备维修需要等方面考虑而把机体分成若干大件，分别进行制造，然后以一定的形式连接成完整的机体。每个大件都是机体的组成部分。如大型压力机的框架式组合机身就是由上、下横梁和左、右立柱组合而成。

焊接的机体是由钢板、型钢或铸钢件焊接而成。它适用于结构形状比较简单和单件小批生产的场合，尤其是大型机器的机体，采用焊接方法制造，其生产周期短，制造成本低。

机体的形状和尺寸通常是根据机体内各零部件的布置及机体与外部零件的关系初步设定，再通过满足强度、刚度和稳定性要求的设计计算，并结合工艺性、经济性和造型设计等要求来最后确定。

机体应根据其工作过程中的最大载荷验算它的静强度，对承受变载荷的机体还应验算其疲劳强度。但是，对于大多数的机体，尤其是各类传动箱和变速箱，评定其性能的主要指标还是它的刚度，如车床主轴箱箱体的刚度，不仅影响箱体内齿轮、轴承等零件的正常工作，还影响机床加工精度。类似这种高精度要求的机体，通常是按刚度条件进行设计。

机体的刚度分静刚度和动刚度，前者是机体在静载下的抗变形能力，后者是衡量机体抗振动能力的重要指标，而且两者有一定联系。当机体抗振要求高时，应按本篇第 2 章“抗振的结构设计”节所述的原理进行设计。

焊接机体的壁板面积较大时，要注意壁板的稳定性，尤其是需在壁板上设置轴承座或开工艺孔时，都会削弱机体的强度、刚度和稳定性。为此，在设计机体时要合理地安排开孔的位置、支承的部位以及肋板的布置等。这些设置既要有利于提高机体的强度、刚度及其整体和局部的稳定，又要有利于保证机体有好的工艺性能（即焊前、焊接和焊后都能进行各种加工）。

机体的结构比较复杂，用一般力学方法（如用表 6.2-1 和表 6.2-3 中的公式）计算，必须对机体结构进行适当简化。因此，计算所得结果与实际情况往往相差较大。常需设计者根据自己的经验进行分析并做出决断。对于重要的机体，可用有限元法计算机体的应力和应变。或用模型和实物进行应力和应变测定，以直接取得数据或对计算结果进行校核。

本章通过几种典型焊接机体，结合该机体性能要求，从焊接工艺和结构特点的角度介绍和分析合理的机体结构设计。

2　减速器箱体焊接结构

大型减速器的箱体从铸铁结构改为钢制焊接结构后，制作简化，节省材料，成本可降低约 50%。此外，还具有质量轻、结构紧凑和外形美观等优点。现在不仅生产单个减速器箱体采用焊接结构，而且在一些机械行业中已形成焊接减速器系列，定型批量生产。

减速器箱体支承的是传动件，要使传动精确和平稳，对箱体的静刚度、动刚度和尺寸稳定性有较高的要求。此外，减速器在使用过程中，有时发生漏油现象，这与构造设计和制造质量有关。因此，设计时也应使箱体具有致密性。

2.1　箱体的结构

减速器箱体可以根据传动机构的特点设计成整体式的和剖分式的箱体结构。剖分式的箱体是把整个箱体沿某一剖面划分成两半，分别加工制造，然后在剖分面处通过法兰和螺栓把这两半联结成整体。整体式箱体虽然刚性好，但制造、装配、检查和维修都不如剖分式的方便，常用于中、小型减速器上。

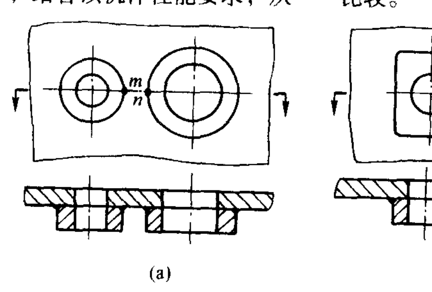
剖分式减速器箱体一般只取一个剖分面，个别大型减速器为了制造、运输或安装方便，也可取两个剖分面。剖分面的位置常取在齿轮轴的轴线上。于是，剖分式箱体是由上盖、下底、壁板、轴承座、法兰和肋板等构件组成。

箱体的壁板有单层壁和双层壁两种结构。后者壁板取得较薄，仍具有较大的抗弯强度和抗扭刚度，而且质量轻，常为重型减速器采用。壁板厚度由刚度计算确定，也可根据结构需要和参考类同的产品初步确定，最后作刚度校核。

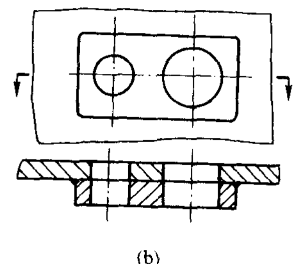
箱体上轴承座的结构以及它与壁板之间的连接是箱体结构设计的主要内容。由于载荷是通过轴承座传递到壁板上的，所以除轴承座之外，连接部位的刚性要求也很高。

表 6.5-1 列出可供选用整体式的轴承座及其与壁板连接的各种结构，表 6.5-2 为剖分式轴承座的结构。

在减速器箱体上经常有两个或两个以上的轴承座平行排列。整体式箱体中有如图 6.5-1 所示的两种结构形式。图 6.5-1a 适用于大型减速器的箱体，特别是相邻两轴承座的内径相差大，两轴线距离也较远的情况。其特点是两轴承座是单独制作的。如果属中、小型减速器箱体，其轴承座内径相差不大，而且轴线距离较小时，建议采用图 6.5-1b 的结构，即两轴承座用一块厚钢板或铸钢件制成。这样的结构不仅刚性大，而且制作十分简单和方便。同理，对剖分式箱体中也可按类似原则进行设计，表 6.5-3 列出三种构造形式进行比较。



(a)



(b)

图 6.5-1　减速器箱体两相邻轴承座结构



表 6.5-1　在箱体壁板上整体式轴承座的结构

序号	结构图	说明
1		壁孔本身即是轴承座，轴承直接安装在壁孔内，轴承外径与壁孔内径是过盈配合。用于壁板较厚的场合
2	(a)　(b)	用附加板以增加轴承座的长度，附加板坯料由厚板切割成，用角焊缝与壁板搭接。图a可获得内壁为平面。 结构简单、经济，但镗内孔时搭接间隙易进铁屑。在平行壁板方向的压力不大时采用
3	(a)　(b)	轴承座插入壁板内，图a使内壁面平齐。装配与对中较困难。在壁板上受较大压力，在垂直壁板有扭矩的场合下采用
4	(a)　(b)　(c)	在轴承座上加工有止口，虽增加加工量，但装配和对中很方便。图a与图b使内壁保持平面，图a、图c不需开坡口。适用情况同序号3
5	(a)　(b)	轴承座长度较大，由管子做成。有轴向力时，宜用图a的结构。加肋板是为了改善力的传递和增加局部刚性
6	(a)　(b)	箱体为双层壁的结构时用的轴承座，两壁板距小时用图a结构，大时用图b结构，图b是把薄壁筒预先与两轴承座焊成整体，这样易保证两密封面的平行度和对中。 刚性大，能承受较大的轴向力和垂直壁板的扭矩。图a需用锻件，成本高，制造周期长，图b可用钢板割卷，经济、周期短

表 6.5-2　剖分式轴承座及其与壁板连接的结构

序号	结构图	说明
1		轴承座为长方形，两个长孔是供螺栓连接上下轴承座时用。 适用于轴径 $d < 50$ mm
2		由平钢板弯成半圆的轴承座，螺孔设在法兰上。 适用于轴径 d 较大，载荷较小的场合
3		由厚钢板用数控切割机割成元宝状的轴承座，螺孔较短。 适用于轴径 $d = 50 \sim 120$ mm
4		轴承座为铸钢件，有止口，易于与壁板装配。 适用于轴径 $d > 120$ mm

表 6.5-3　剖分式箱体轴承座的结构形式

序号	结构图	说明
1		轴承座单独制作，结构零件多，焊接量大。适用于大型减速器或轴承座外伸长度大，各内径相差悬殊或轴线距离远的箱体
2		若干个轴承座从一块厚钢板上做出。适用于中、小型减速器或轴承座外伸短，各内径相差小，轴线距离近的箱体。质量较大，但制造工艺大为简化
3		与序号 2 的区别在于轴承座的毛坯是用数控切割方法从厚钢板中制备，或用铸钢件。质量较轻

为了改善力的传递，提高轴承座与壁板连接处的局部刚性和减小壁板厚度，可以在轴承座周围设置肋板。如果在箱体外设置肋板不仅可增加箱体的刚性，还可增加减速器的散热面积。对于整体式的轴承座其肋板多呈放射状，匀称地布置于周围；而剖分式的轴承座周围肋板布置视承载性质及其大小而定。图 6.5-2 是常用的加肋方式。一般情况下在轴承座上下加一块肋板即可（图 6.5-2a）；受重载荷时，建议采用“Π”形肋图（6.5-2b），它由槽钢或冲压件制备，这种肋板刚性大而焊接量少；如果轴承座受到好几个方向的弯曲载荷和轴向力，宜用图（6.5-2c）的布置方式，缺点是焊接量较大，且施工复杂。

2.2　箱体的致密性

焊接的减速器箱体在使用过程中有时出现漏油现象。渗漏处大多发生在剖分面、轴承盖和焊缝区上。焊缝区的渗漏是因有焊接工艺缺陷未被发现所致。解决这个问题除了注意从焊接材料选择和焊接工艺方面采取合理措施外，在结构设计方面应注意以下几点。

1）壁板与上盖、下底、法兰、轴承座的焊缝要采用双面焊缝。如用双面角焊缝或开坡口背面封底焊缝等，以增强焊缝的抗渗漏能力。表 6.5-4 列出轴承座和法兰与壁板之间焊接接头的几个设计方案。

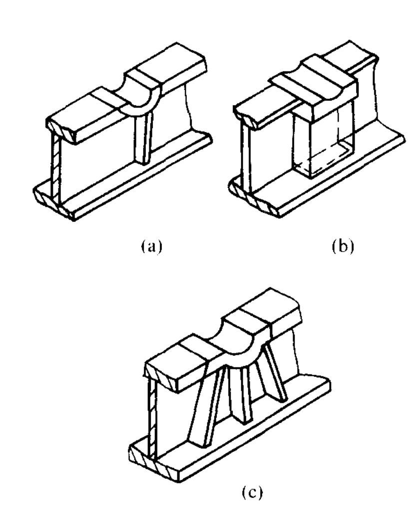


图 6.5-2　剖分式轴承座的肋板设置方式

2）每条密封焊缝都要处在最好条件下施焊。焊缝周围需留出便于施焊和质量检验的位置和自由操作空间。图 6.5-1a 中，如果两轴承座靠得很近，则在 m、n 处的焊缝很难施焊，无法保证焊接质量。如果采用图 6.5-1b 的结构，就不存在难施焊的问题。当轴承座孔径较大或外伸长度短的情况下，最好在座孔内侧加焊一道内环缝。这样既方便内孔加工，又减少漏油可能。该内环缝宜开适当坡口，以保证有较大熔深。

在正常情况下，容易发生焊接缺陷的是空间三面焊缝的汇交点或焊缝方向发生急剧变化处。图 6.5-3 表示在减速器箱体内侧需焊一个方形螺钉座，图 6.5-3a 的 c 点是三条焊缝汇交处，d 和 e 点等是焊缝方向发生 90°转弯处。这些部位焊接质量不易保证。只要有一处渗漏，油即从螺孔中向外流出。改善办法之一是采用圆柱形的螺钉座，见图 6.5-3b，预先把它焊在壁板上，只需保证环形角焊缝质量，就可减少渗漏机率。在焊缝汇交或拐角处单独封角焊，防漏效果也很好。

在减速器箱体上，为了固定轴承盖，需在箱壁上钻螺孔。孔深大时，须设置螺钉座。图 6.5-4a 的设计容易造成渗漏，应按图 6.5-4b 设计。

表 6.5-4　轴承座和法兰与壁板间的焊接接头设计

序号	与壁板连接方式	示意图	说明
1	角接		轴承座与法兰采用 K 形坡口双面焊缝。a 点是起弧点或收弧点，不易与壁板熔合，易发生渗漏；若 b 缝不焊，则焊接 c 缝后，b 缝易张开，当 c 缝有缺陷时，易渗漏。故 b 缝须焊接，且开坡口深焊以防止面加工时被削去。d 焊缝端头应碳弧气刨挖除，重新焊接避免未熔合的间隙处渗漏
2	局部搭接		轴承座与法兰采用 K 形坡口双面焊缝。若 a 点背面没有焊缝，则易渗漏。要保证焊缝 b 的致密并使焊缝 d 和焊缝 c 汇交处充分熔合
3	T 形接		采用单边 V 形坡口封底焊缝连接轴承座和法兰，用双面角焊缝连接 T 形接头，这样的接头不易渗漏。若轴承座和法兰采用 K 形坡口双面焊，则在壁板的上端无法施焊

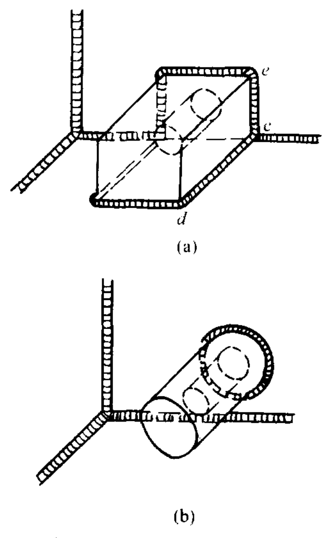


图 6.5-3　防止渗漏的设计

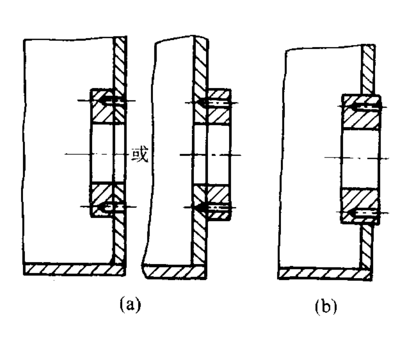


图 6.5-4　固定轴承盖的螺钉座

3）规定箱体做致密性试验，加强焊缝表面质量检查。建议采用磁粉或着色渗透性检验，用以发现可能具有穿透性气孔、夹渣或未熔合等表面缺陷，并加以焊补。对于双面焊缝一般不宜用煤油试验，因双面焊缝的缺陷一般不可能在同一断面上产生，短时试验难以发现渗漏。



按刚度条件设计的减速器箱体，其材料一般都选用普通结构钢，如 Q235A 等。为了获得焊后机械加工精度以及保证使用过程中尺寸的稳定，焊后需作消除应力处理，如用退火或振动等方法。

2.3　实例

（1）整体式的焊接箱体

图 6.5-5 示出的是机床主轴箱的焊接箱体。该箱体是矩形截面的封闭六面体，具有很好的抗弯和抗扭性能。其前后轴承座为铸钢件，保证了局部刚性。为了支撑各挡齿轮轴，在箱内的底板上焊有三个支承座。箱体四角都采用压弯成一定圆角的钢板（见图中 B—B 剖面）。箱盖也用冲压件制成，并在四周焊有加强圈，以增加其刚性，且便于安装挡油板和放置油封填圈。该箱体外观焊缝少，美观大方。

（2）单壁板剖分式焊接箱体

图 6.5-6 为三辊弯板机减速器焊接箱体。整个箱体除底板用 36 mm 厚的钢板外其余周壁均用 25 mm 的钢板焊成，保证了总体的刚度。在箱体外侧轴承座处设置厚度为 20 mm 的肋板，起到局部加强，兼有散热的作用。因壁板较薄，凡有配合要求的壁孔，都附加有轴套，见图 6.5-6a、d 的孔。图 6.5-6d 的轴套加工有台阶，焊接时定位很方便。观察孔的孔径不大时，就直接在壁板上开出，见图 6.5-6c。

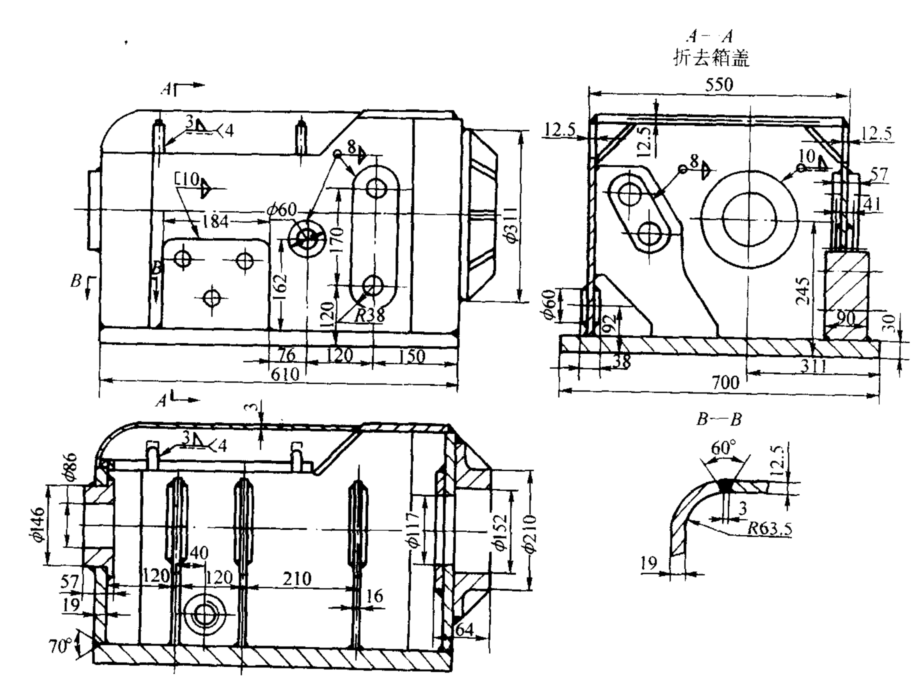


图 6.5-5　整体式机床主轴箱焊接箱体

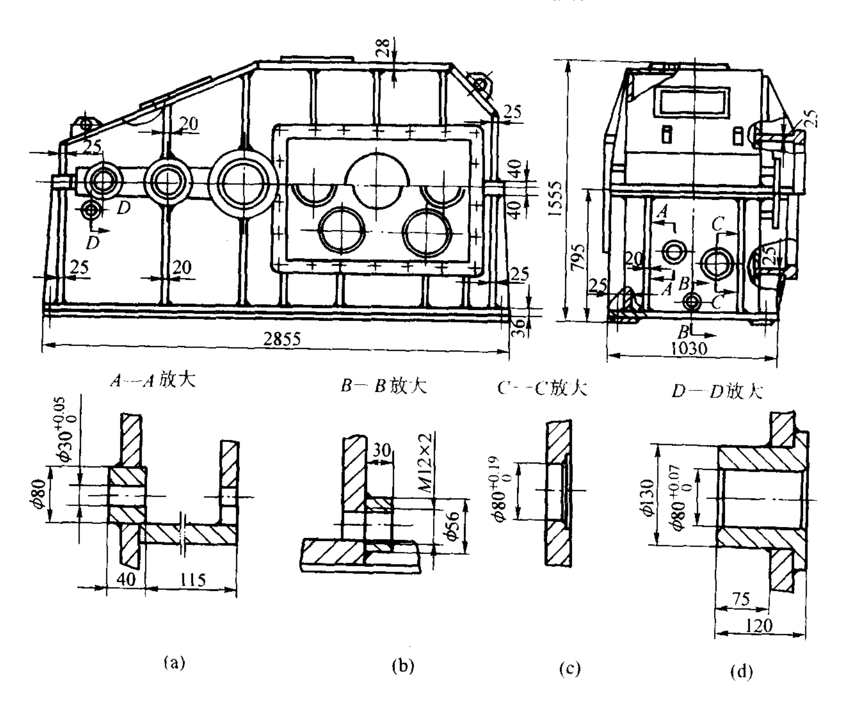


图 6.5-6　三辊弯板机减速器焊接箱体

图6.5-7是一个颇具特色的剖分式减速器焊接箱体。它的上下箱体基本对称；四个轴承座都在一块板料上作出，因它的周边是直线，焊接量少，制造工艺十分简单；上、下盖板是整块钢板的冲压件；由于上下和左右对称，零件少，备料工作简化；在最大轴承座处采用"Π"形截面肋，局部刚性好且焊接量少，在上方采用斜肋，使刚性过渡平缓。

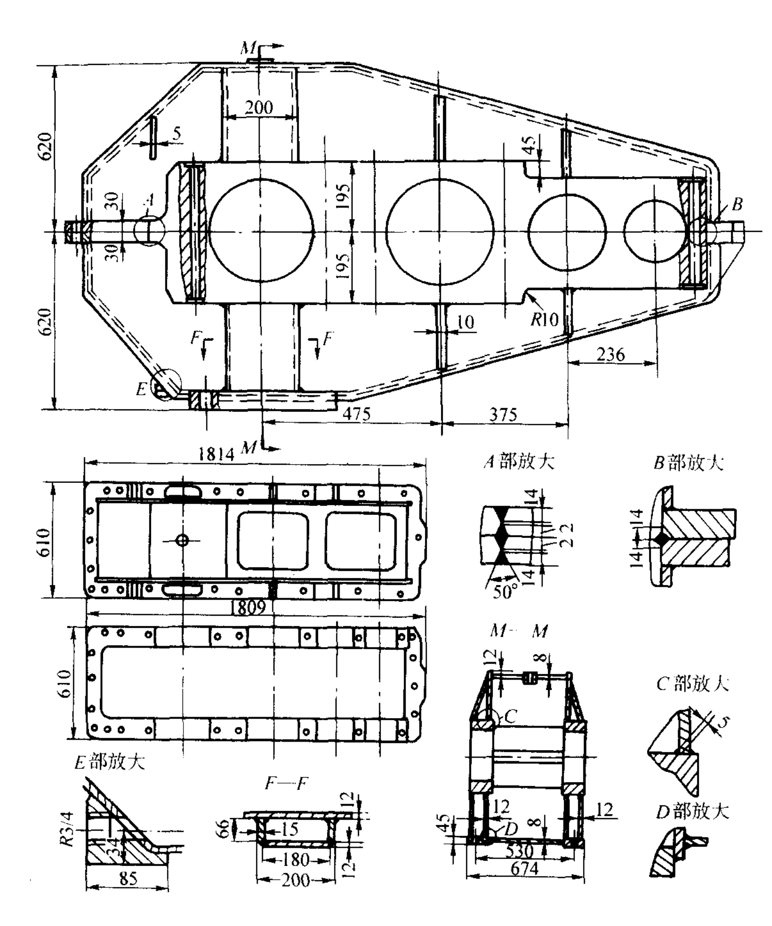


图6.5-7　上下对称的剖分式减速器焊接箱体

(3) 双层壁剖分式箱体

图6.5-8示出双层壁剖分式减速器箱体下箱体的焊接结构。其特点是四个轴承座由一个铸钢件制成；在轴承座下方双层壁板内加肋板；在起重吊钩处适当加强。因箱体四壁均为双层壁结构，所以整个箱体的抗弯和抗扭刚度都很大，质量小。

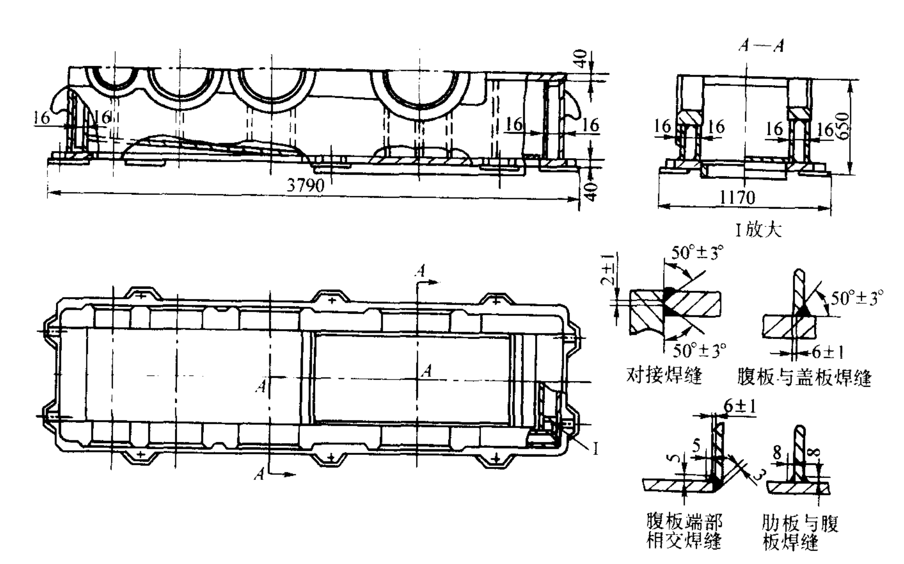


图6.5-8　双层壁剖分式减速器下箱体的焊接结构



3　机床基础件焊接结构

大型机床（如龙门刨床）的机体主要由床身、立柱和横梁等大件组成，这些大件通称为基础件。对于普通车床，由于用不着立柱和横梁，所以它的机体就是床身。

3.1　机床床身的焊接结构

机床床身是机床最主要的基础件，过去是铸铁结构。由于受铸造设备容量的限制，铸铁结构只能用于制造中、小型的机床床身。而且是在批量生产情况下才经济。随着焊接技术发展，大小型的机床床身都可采用焊接结构。而且在单件小批生产条件下，更显示出它的优越性。

3.1.1　床身的工作特点和设计的基本要求

机床床身的主要功能是承载、导向和连接各大件。机床的其他零、部件，或者固定在床身上，或者工作时在它的导轨上运动。

床身在工作时承受的力有如下几种。

① 切削力　通常沿 x、y、z 三个正交方向分解成三个切削分量，直接或间接作用到床身上。

② 重力　包括工件和机床自身各零部件的重量。

③ 摩擦力　移动件和床身相对运动时导轨之间的摩擦力。

④ 夹紧或顶紧力　是连接其他大件和移动件之间的连接力。

⑤ 惯性力。

⑥ 冲击或振动干扰力。

⑦ 热应力等。

在这些力的综合作用下床身将发生弯曲和扭转变形；导轨上可能发生局部变形；冲击和振动干扰力会引起床身的振动等。它们直接影响机床的加工精度。因此，设计焊接的机床床身时必须满足下列要求。

1）应具有足够的静刚度　在最大允许载荷下变形量不超过规定值，工件或其他零部件在床身上移动时，其静刚度的变化要小。

2）动刚度好　在预定的切削条件下，工作时不发生振动和噪声。

3）温度场分布合理　工作时应具有较小的热变形和热应力。

4）导轨受力合理　变形小，且耐磨。

5）工艺性能好　易于焊接和机械加工，焊接变形易于控制，焊接残余应力易于消除。

由于机床有高的加工精度要求，允许床身的变形量很小，相应地在工作时引起的应力远小于由强度决定的许用应力，所以对机床床身主要是以许用变形为依据的刚度设计，而不是强度设计。如果只需把原有铸造结构的床身改为焊接结构，则以原铸件的刚度为依据，按等刚度原则进行焊接结构设计。

按刚度条件设计的焊接床身对材料并不要求高强度，而是要具有良好的焊接性能，通常选用 Q235A 钢就能满足要求。如果是大厚度的钢板，应选择镇定钢。

对于高精密机床，热变形是影响加工精度的主要因素。热变形改变了工件与刀具的相对位置，也就破坏了机床的原始精度，必须控制在允许值之内。机床上热源分布不均，构件几何形状和尺寸不同，材质的差异等都是引起热变形的原因。改善机床的热变形特性，需在机床总体设计时综合考虑，不能单独考虑床身的热变形。在结构设计上减小热变形可采用如下措施。

1）扩大散热条件，如适当焊上一些散热片以增加其散热面积。

2）采用热对称的结构，即相对于热源是对称的结构。尽可能使温差引起热变形的前后，结构的中性轴不变或少变；在床身上的板壁厚度尽可能均匀。

3）提高抗热变形的刚性，尽可能采用封闭截面结构。

4）采用双层壁结构。因两壁之间的空气具有隔热作用，且温升少的一面对另一面的热膨胀起到拘束作用。

床身焊后在机械加工之前必须进行降低焊接残余应力处理，否则难以达到所需的加工精度和保持形状和尺寸的长期稳定。

3.1.2　机床导轨及其支承结构

机床上的导轨主要是起导向和传递工作载荷的作用。它的变形直接反映到刀具与加工表面上，刚性不足会严重影响加工精度，还加快机件磨损和运动不正常。因此，导轨及其支承结构必须具有足够的刚性。

（1）导轨与床身的焊接

导轨与床身的连接方法主要有机械固定、粘接和焊接三种。从连接刚度看，以焊接方法为最好。但是，采用焊接方法必须解决好两个问题，即当导轨和床身之间因材质上的差别而给焊接工艺带来的困难问题；焊后导轨的精加工及其表面强化的可能性问题。

床身材料多为焊接性能好的普通低碳钢，如果采用与床身相同的材料作导轨，焊接工艺简单，如果采用中碳钢（如 45 号钢）作导轨，它和床身焊接困难大一些。只要焊接工艺适当（如预热、缓冷和低氢的焊接材料）是可以焊接的。

导轨与床身焊后，在精加工和表面改质（如硬化）处理之前，必须做降低焊接残余应力处理。

（2）导轨的支承结构

在设计导轨的支承结构时，要避免力的作用方向垂直支承壁板的平面，而尽量使力直接作用在支承壁的中性面内。车床上的导轨大致有单壁、单壁加肋、双壁和直接支承等结构，见表 6.5-5。

表 6.5-5　焊接机床床身导轨的支承结构

类型	简图	说明
单壁		结构简单，易于制造，但支承刚性差。适用于小载荷的床身上
单壁加肋		结构较简单，刚性较好，但肋板焊缝多，制造较复杂，适用于中等载荷的床身上
双壁	(a)　(b)	结构较复杂，但刚性大，焊接量少，图 a 适用于轻型车床；图 b 适用于中等或重载荷的车床上



续表 6.5-5

类型	简图	说明
直接支承		导轨直接由床身壁板支承，内壁有肋板加强，刚度大

3.1.3 床身的结构

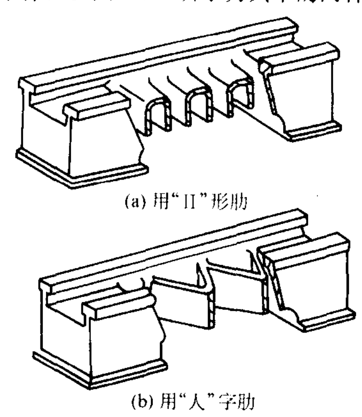
中小型机床的床身通常由床腿（或底座）支承，也可以将床身、床腿焊成一个整体；大型机床的床身一般是直接安装在基础上。设计时，把长的床身看成是一根梁，短的床身看成是一台架。

(1) 普通车床床身

普通车床床身较长，按弹性梁设计。工作床身的变形有主体的弯曲变形、扭转变形和导轨的局部变形，其中扭转变形占总变形量的50%～70%。

设计车床车身结构的主要困难是除应满足一般机床所要求的静刚度、动刚度、尺寸稳定性等外，还应具有供排除切屑和冷却液流动的通道。

铸造的床身因无法作成封闭截面的结构，所以多用开式截面的结构，排屑等问题易于解决。但是，床身的抗弯和抗扭刚度必须依靠增加壁板厚度和在前、后壁板之间设置各种形式的肋板来保证。图6.5-9所示为其中的两种。



(a) 用"Π"形肋

(b) 用"人"字肋

图6.5-9 铸造车床床身

焊接床身的刚度主要不是靠增加钢板厚度和大量使用肋板，而是尽可能利用型钢或钢板冲压件组成合理的构造形式来获得，要把结构中肋板的数量或焊缝的数量减至最少。

小型车床因扭转载荷不大，可以设计成图6.5-10所示的结构。其特点是导轨用双层壁局部加强；前后壁主要由若干个"Π"形肋连接以获得一定的抗扭性能；底座、"Π"形肋和油盘均为冲压件。这种焊接床身结构简单，焊缝少，质量轻。

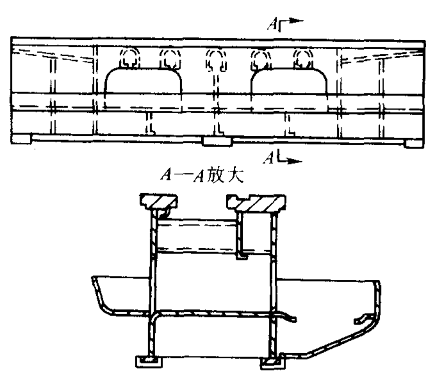


图6.5-10 小型车床焊接床身

开式断面结构的抗扭性能远低于闭式断面的结构。因此，大中型车床的焊接床身应设计成具有封闭形状的断面结构。图6.5-11提供几个比较理想的断面结构形式，图6.5-11a、b有斜通道，切屑和冷却液经通道从后壁孔排出。导轨均由闭式双层壁支承，刚性好。

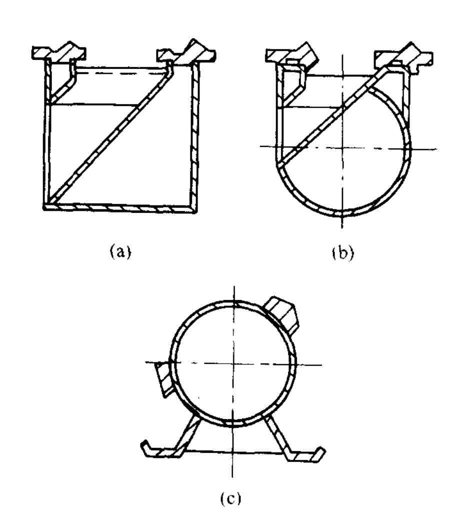


图6.5-11 焊接床身的断面结构

图6.5-12是根据图6.5-11a的断面结构形式设计的普通车床的焊接床身。在图中把组成该床身的零、部件以图解方式表示在它的周围。注意纵梁4的斜板，它把整个方箱断面分割成具有两个三边形的断面。下方是一个全封闭三边形的断面，它具有较大的抗弯和抗扭性能。这里纵梁、"Π"形肋和液盘等均为冲压件，减少了焊缝数量。这样的结构适用批量生产的焊接床身。

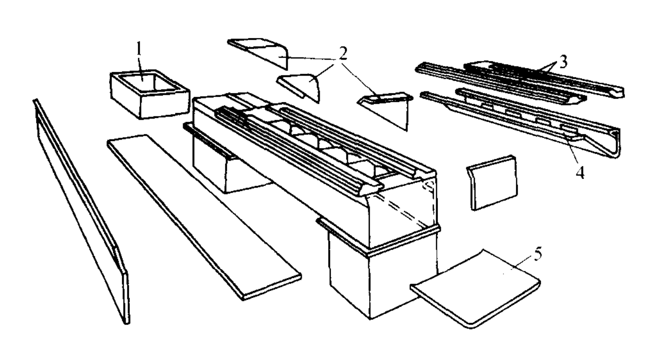


图6.5-12 普通车床焊接床身及其零、部件

1—箱形床腿；2—"Π"形肋；3—导轨；4—纵梁；5—液盘

(2) 铣床、磨床床身　这类床身较短，常设计成能承受重力和切削力的刚性台架式结构。按焊接工艺特点，本着少用肋板而尽可能采用箱体形结构的原则进行设计。

图6.5-13是一台卧式铣床的焊接床身的结构。其特点(见图中 *B—B* 剖面)是巧妙地利用3个钢板冲压件，组焊成具有3个封闭箱体床身主体结构，焊接接头少；底板是用稍厚一些的5条扁钢组焊成的边框而减轻质量、节省材料；用 w (C) 0.4%的中碳钢作导轨，直接焊到壁板上，用双层



壁支承。焊后对导轨作火焰淬火和磨加工。整个床身质量轻、刚性大、结构紧凑。

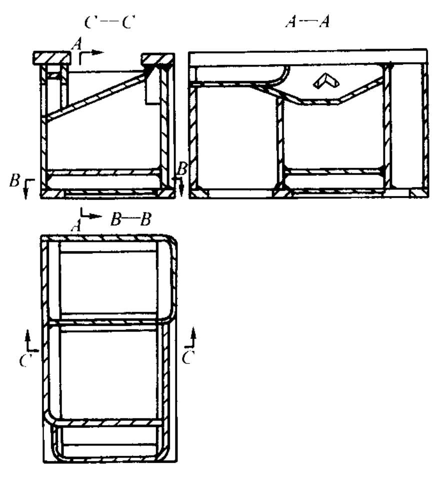


图 6.5-13　卧式铣床床身焊接结构[20]

图 6.5-14 是一台高速内圆磨床的焊接床身。该磨床的砂轮转数为 5 000 ~ 10 000 r/min，工件转数达 500 ~ 1 200 r/min，对床身要求有高的动刚度。

该磨床充分发挥了焊接结构的特点，突出地体现了从构造设计方面去提高床身的固有频率，防止发生共振。同时，充分利用吸振焊接接头以增加结构的阻尼特性。图中在轴承座处须传递切削力，采用了两块厚板支承，其余均用薄板 (6.4 mm) 冲压件，使两侧组成具有许多小的封闭断面的箱体结构。这样的结构质量轻而静刚度大，所以具有较高的固有频率；内部冲压成 U 形的隔板与壁板构成 7 个 U 形吸振接头。此外，除箱体表面的焊缝为连续焊缝外，内部所有 T 形接头均用断续角焊缝连接，增加了结构的吸振能力。

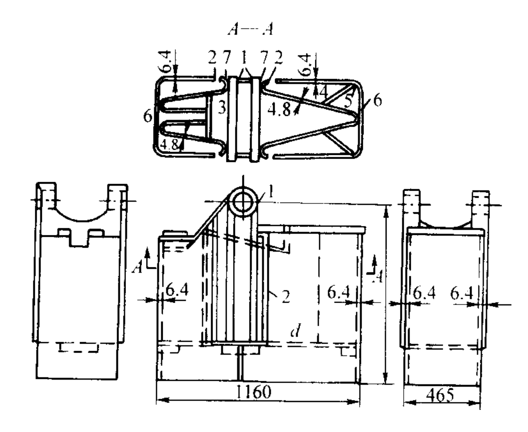


图 6.5-14　高速内圆磨床的焊接床身

1、2—连续焊缝；3、4、5—间断焊缝；6—塞焊缝；7—减振接头

(3) 龙门式刨床、镗床、铣床床身　龙门式机床多为大型或重型机床，这类床身长度较大，在工作时主要承受弯曲载荷。不需要穿过床身排除切屑，因而可以设计成封闭的箱形断面结构；床面上承受重力大，为了稳定，不设床腿，床身直接安装在基础上，使床身高度尽量减小；导轨的接触面较大，在它的正下方或附近，设置支承壁或垂直肋，以保证导轨的支承刚度。

表 6.5-6 列出适用于焊接床身断面结构的几种形式。

表 6.5-6　龙门式机床焊接床身断面结构形式

序号	结 构 简 图	说　　明
1		内部有纵向和横向肋板，整个床身是一个箱格形的结构。制造比较简单，应用较多。应用实例见图 6.5-15
2		内部既有纵向和横向肋板，又有斜肋，其抗弯、抗扭和吸振性能较高，但制造比较复杂，应用实例见图 6.5-16
3		由矩形管组成的箱体结构，矩形管可以是无缝的，或由冲压和焊接单独制成的，床身总装焊很简便，两管壁连接处相当纵向肋，其接触面构成接触阻尼起吸振作用。因无横肋和斜肋，抗纵弯能力强而抗扭性能较弱。质量轻，适于批量生产

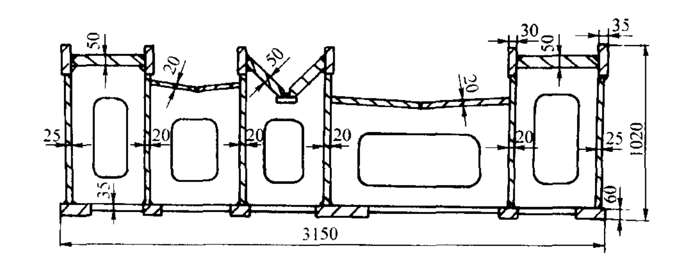


图 6.5-15　大型龙门铣刨床焊接床身断面结构

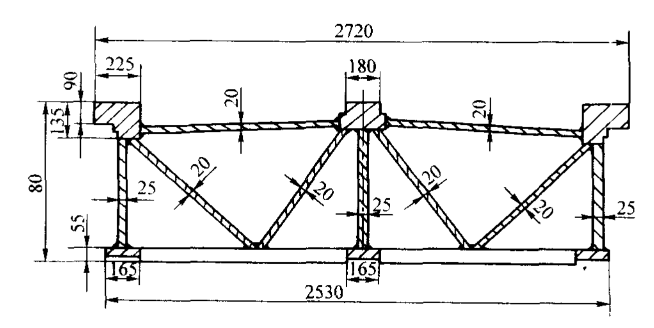


图 6.5-16　龙门铣床焊接床身断面结构

图 6.5-15 所示为大型龙门铣刨床焊接床身（中段）的应用实例。该床身中间 4 条纵向肋和两侧壁构成 5 个箱形结构；整个床身很长，仅中段的长度为 8.5 m，所以每隔 900 mm 左右设置一横肋板，厚为 15 mm，中间开减轻孔，整个床身成为箱格结构。底板较厚，有工艺孔，供施焊内部焊缝时焊工出入。

图 6.5-16 所示为一台龙门铣床焊接床身其中一段的断面结构。其特点是内部除有纵、横肋板外，还有斜肋；导轨下面均有垂直壁和斜肋直接支承，整体和局部刚性都很大。

3.2　机床立柱的焊接结构

重型机床的立柱采用焊接结构的主要目的是在不影响技术性能前提下减轻质量和降低制造成本。根据焊接特点，采用薄壁结构对减轻质量最为有效。但是，要使薄壁结构具有所要求的刚度和吸振能力，又不发生薄板屈曲和颤振噪声问题，就必须采取较为复杂的结构，于是制造成本增加，这是设计焊接立柱结构需要解决的主要矛盾。

机床的立柱主要承受轴向力、弯矩和扭矩载荷，通常是通过导轨传入到柱体内。设计焊接立柱时要处理好断面结构、导轨的配置和肋板的合理运用等问题。

（1）断面选择

对于单柱式机床的立柱，下端固定上端自由，可看成悬臂梁。这种立柱宜选用圆形、方形或较为对称的多边形空心封闭断面结构。因这些断面具有较大的惯性半径、较好的抗弯和抗扭的综合性能，而且焊接并不困难。对于双柱式机床的立柱，由于它位于工作台（床身）两侧，上端有顶梁连接，下端常与床身相连，构成龙门状，所以其断面宜选用长方形的箱体结构。其深度 h 和宽度 b 之比，对立式车床的立柱取 3～4，刨床或铣床取 2～3。

（2）导轨配置

考虑导轨的位置及其支承方式时，要使力的传递合理、刚性好和便于制造。图 6.5-17 所示是立柱断面和导轨配置的几种结构形式。图 6.5-17a、d、g 的导轨配置不理想，工作时立柱的前壁板有较大变形，支承刚性差；图 6.5-17b、e 的导轨有后面侧壁直接支承，刚性较好；图 6.5-17h 的导轨其切向力直接由圆筒壁支承，从而提高支承刚性；图 6.5-17c、f、i 的断面内部有纵向肋，构成多个封闭断面的组合结构，大大地提高了整体的抗弯和抗扭刚度以及吸振能力。其导轨直接由肋板和侧壁支承，受力合理。但是，这种形式的结构制造较为复杂，当柱内腔需悬吊平衡重物时，不便采用。

（3）壁板与肋板的设计

正确使用肋板，既可以减薄壁板厚度而又不降低其刚性，甚至还能获得吸振能力强，避免薄板屈曲和颤振的结构。

1）板厚的确定　焊接结构的板厚可根据强度或刚度来确定，但最小厚度要受其他制造因素限制。如果立柱焊后须进行热时效处理，其壁厚不能太薄，表 6.5-7 是确定壁板和肋板厚度的参考值。

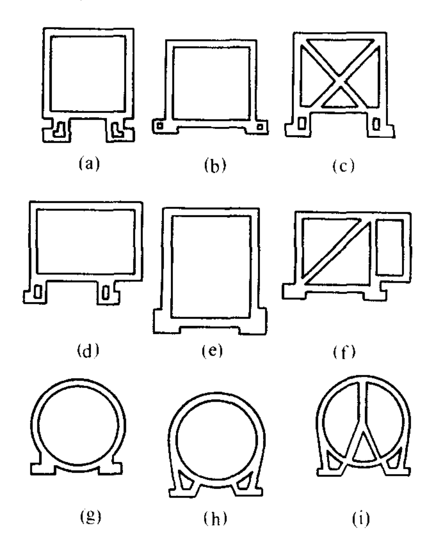


图 6.5-17　立柱的断面形式与导轨的配置

表 6.5-7　壁板和肋板厚度参考值　mm

壁　和　肋	大　型　机　床	中　型　机　床
外壁和纵向主肋板	20～25	8～15
一般肋板	15～20	6～12
导轨支承壁	30～40	18～25

2）肋板布置　为了提高壁板的刚度和固有频率，防止发生颤振，须在壁板内侧布置肋板。表 6.5-8 示出常用几种肋板布置形式。这些肋板与壁板用断续角焊缝焊接，以增加结构的吸振能力。

3）采用双层壁　大型机床的壁板采用双层壁结构是减轻重量，提高动、静刚度的好措施。根据刚度要求，立柱的周壁均可用双层壁，也可以只在导轨支承壁处采用双层壁。采用双层壁后，壁板和肋板厚度可减薄，由于内壁板不直接传递载荷，其厚度比外壁板可薄一些。肋板与外壁板之间用断续角焊缝连接，肋板与内壁板之间用槽焊缝从外侧进行焊接。

（4）实例

图 6.5-18 介绍国外某落地镗铣床焊接立柱的结构断面。柱体为空心封闭多边形断面；使用钢质导轨，直接焊在柱体上，经表面淬火后磨削加工而成；周壁内侧均采用波浪肋，导轨支承壁采用双层壁结构；后壁两角隅处用冲压件构成方形封闭结构，局部刚性好，可防止断面畸变。沿柱长每隔一定距离设一横向肋板。

表 6.5-8　壁板内侧常用肋板的布置形式

序号	结构简图	特点
1		用等边角钢呈矩形或棱形布置，主要防止薄板的屈曲和颤振，抗弯和抗扭刚度小。制造很简便。 $a \leqslant 400$ mm
2		平板作肋，纵与横呈矩形排列。纵肋抗弯、横肋抗扭和防止断面畸变。控制肋板距 a 可避免屈曲和颤振。从失稳看取 $a \leqslant 60$ t，考虑到动刚度 a 应取得小些，可取 $a \leqslant 20$ t，t 为壁板厚度。制造简单
3		冲压的波浪肋呈棱形排列，两波浪肋构成 U 形减振接头，抗扭和吸振性能好，控制 $a \leqslant 30$ t 可防止屈曲和颤振。制造稍复杂
4		平板作肋，纵、横、斜呈“米”字排列，为了避免汇交处焊接困难，用圆管段作汇交点，抗弯、抗扭和吸振能力较高，但制造工艺较复杂，成本高。肋与肋间构成许多封闭三角形，a 值可比上面的大些

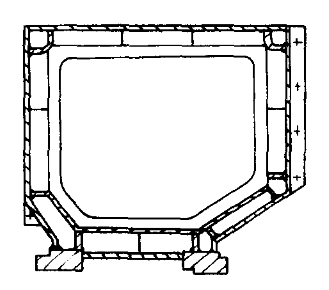


图 6.5-18　多边形落地镗铣床焊接立柱断面结构

图 6.5-19 介绍国产某龙门铣刨床中左立柱的焊接结构。它和右立柱对称，下部和床身连接，上部和顶梁相连，构成龙门架。立柱除承受切削力外，还支承横梁和主轴箱的质量，使柱体受到弯曲和扭转。所以，采用长方形空心箱体结构。前墙须与横梁连接，是受力面，故采用双层壁；在内外壁之间用三条纵向肋加强。后墙和侧墙均为单层壁，且内侧焊有纵向肋、横向肋和“之”字形斜肋，目的是提高立柱的抗弯、抗扭防止断面畸变的能力，也是防止壁板失稳和颤振的有效措施。结构简单，易于制造。

3.3　机床横梁的焊接结构

龙门式机床上的横梁，两端与立柱连接，可看成是两支点梁。刀架沿横梁的导轨作横向移动，工作时承受着复杂空间载荷，既有两个方向的弯曲变形，又有扭转变形。因此，

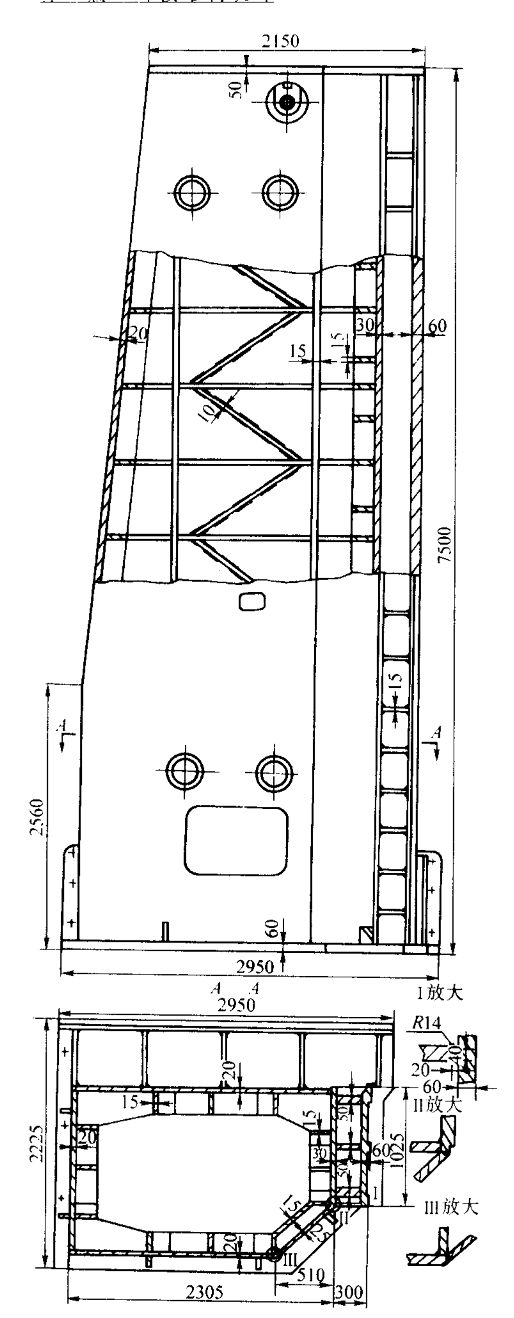


图 6.5-19　大型龙门式铣刨床焊接左立柱

焊接的横梁多采用封闭箱体结构，如图 6.5-20 所示。梁的高度和宽度之比，对于龙门式刨床或铣床取 $\frac{h}{b}\approx 1$；对于双柱立式车床因横梁的长度较大、刀架重，可取 $h/b=1.5\sim2.2$。必要时可设计成图 6.5-20（右图）中所示的双矩形断面的结构，以增加垂直面的抗弯刚度，这样的结构制造时，要注意控制好焊接变形。

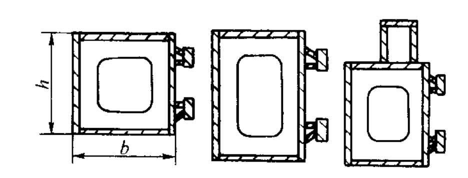


图 6.5-20　龙门式机床焊接横梁的结构断面

为了提高横梁的整体或局部刚性，在箱体内可根据需要设计各种肋板。导轨支承壁的壁厚应取得厚一些。

沿横梁长度上的高度和宽度，最好是不变的，这样焊接生产简单方便。对于重型的或跨度很大的横梁，可以采用不等高或不等宽的断面，这样能节省金属和减轻结构质量，但是要以增加制造成本为代价，因为变断面梁的制造工艺复杂。

图 6.5-21 为螺旋桨翼面加工专用机床横梁的焊接结构图，该梁长约 11 m，重约 24 t。为了增加刚性采用箱形结构，内部加斜肋提高抗扭性能和防止断面畸变。为了减振，斜肋采用断续角焊缝焊接。导轨经表面淬火和磨削，粘接在导轨支座上。

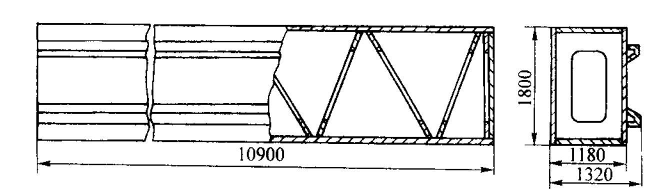


图 6.5-21　螺旋桨翼面加工专用机床焊接横梁

图 6.5-22 是单柱式大型立车上悬壁梁的焊接结构，采用不等高的矩形封闭断面，内部用斜肋交叉的布置，交叉点处设置圆钢管避免焊缝密集且易于施焊。肋板与壁板的连接用断续角焊缝，提高吸振能力。焊接导轨下面由双层壁支承。在梁内与导轨对应处，设置纵向肋以提高导轨的支承刚性。

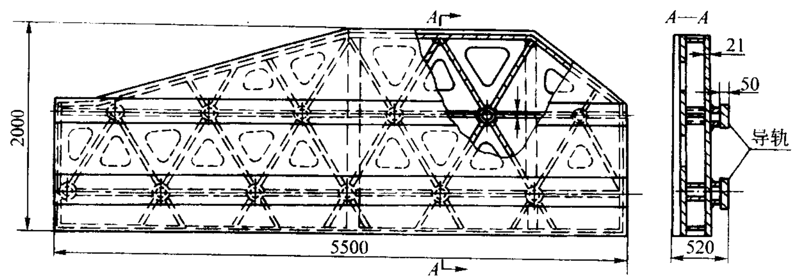


图 6.5-22　单柱支承的悬臂式焊接横梁

4　锻压设备机身焊接结构

4.1　概述

机械压力机、液压机、折边机等锻压设备都是对金属施加压力使之成形的机器，工作力大是它们的基本特点。其机身宜采用焊接结构，特别像重型的机械压力机和液压机的机身采用焊接结构经济效益更为显著。

机械压力机和液压机的工作条件有区别，但其机身结构形式却是类似的，如立式的机身结构都设计成开式的或闭式的，如图 6.5-23 所示。

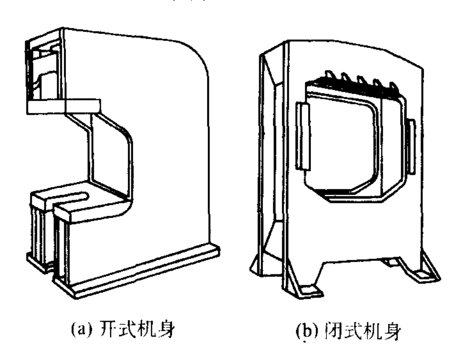
开式压力机机身呈“C”字形。其前、左、右三面敞开，



操作范围大而方便，机身结构简单。但刚性较差，适用于中小型压力机。

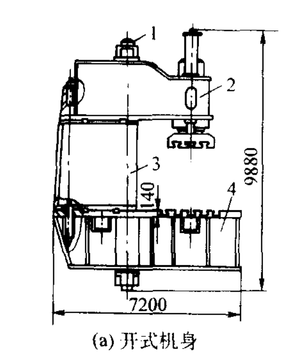
闭式压力机机身，两侧有立柱，只前后敞开，操作范围受一定限制。但刚性大，因而工作精度高。工作台的尺寸较大，适用于大、中型压力机。

大型机身的结构，考虑到合理受力、便于加工制作、安装与维修以及起重运输等因素，可以设计成组合式的，如图 6.5-24 所示。图中是靠拉紧螺栓把横梁、立柱和底座连接成整体。这是一种预应力结构。

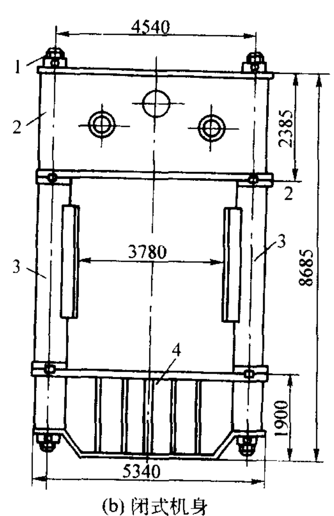


(a) 开式机身　(b) 闭式机身

图 6.5-23　压力机机身结构基本形式



(a) 开式机身



(b) 闭式机身

图 6.5-24　组合式压力机机身

1—拉紧螺栓；2—横梁；3—立柱；4—底座

图 6.5-25 所示为一种三梁四柱式液压机示意，它由四根圆立柱通过内外螺母将上、下横梁牢固地连接起来，构成一个刚性的空间框架，活动横梁以立柱导向，上、下移动进行工作。这些横梁和立柱都可采用焊接的结构，单独进行制造。

压力机在工作时，机身承受全部变形力，它必须满足强度要求，通过取较低的许用应力以充分保证工作安全和可靠。同时，还必须具有足够的刚度，因为机身的变形改变了滑块与导轨之间相对运动的方向，既加速导向部分的磨损，又直接影响冲压零件的精度和模具寿命。

设计机身时要注意：总体结构和局部结构的强度和刚度力求均衡；在满足强度和刚度的前提下使结构尽量简单，质量轻。使制造、安装调整、修理和更换各零部件方便和容易；在焊缝布置上，应尽可能不使其承受主要载荷。

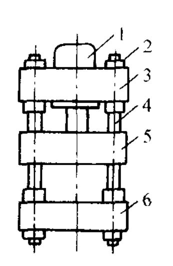


图 6.5-25　三梁四柱式液压机示意图

1—液缸；2—螺母；3—上横梁；
4—立柱；5—活动横梁；6—下横梁

机身所用的材料主要是普通碳素结构钢，以 Q235A 钢应用最多，个别强度要求高或要减轻机器质量时，可选用普通低合金结构钢，如 Q345（16Mn）等。但要注意，因压力机的许用应力取得较低，结果板厚较大，例如 Q345（16Mn）钢板在大厚度焊接时，可能产生焊接裂纹，为此，常在焊前预热。这样劳动条件变差而工艺成本增加。

采用铸－焊联合结构时，铸钢多选用 ZG230450H 或 ZG270 500H 钢。

焊接方法主要是电弧焊，（以 CO_2 焊应用最多，厚板采用 CO_2 多层多道焊），特别厚板也可采用电渣焊。

重型压力机机身，往往为了保证足够的刚度而增加钢板的厚度，其实际工作应力却很小，在这种情况下构件之间的连接焊缝一般并不需要全熔透。而是在满足强度要求的前提下，正确地设计焊缝的形状和尺寸。

对于对接接头，按强度要求确定出焊缝的有效厚度 a 后，必须采用两面焊的结构，如图 6.3-32a 所示。

对于 T 字接头，如果是联系焊缝，按图 6.3-32b 所示，取最小的焊角尺寸 K，可参照表 6.3-4 选用。如果是工作焊缝，在厚钢板情况下建议采用图 6.3-32c 所示的两面开小坡口的部分熔透的角焊缝，其尺寸通过强度计算确定。当背面施焊较困难时，可采用图 6.3-32d 所示单面开坡口的结构。

计算焊缝的工作应力有困难情况下，常采用一些经验数据，详见本篇第 3 章 3、4 节。

4.2　开式压力机的 C 形机身的焊接结构

开式压力机的 C 形机身可当作弯梁进行强度和刚度设计见（图 6.5-26a）。其断面形状有单腹板和双腹板结构，双腹板结构中有些是开式断面，有些是闭式断面。喉口构造对机身的强度和刚度影响很大，在喉口上下转角处有应力集中，其集中程度随喉口深度 D 的增大和转角圆弧半径 R 的减少而增加。设计时，尽量减少喉口的深度和适当增加转角圆弧半径，以提高疲劳强度。

机身工作时，在腹板的喉口边缘产生较高的拉应力，往往需加强。图 6.5-26b、c、d、e 等为加强的结构措施。图 6.5-26b 是单腹板机身，用“T”形断面，翼板起加强作用。它只适用于小型压力机的机身。图 6.5-26c 是在腹板喉口边缘处用补强板局部加厚，沿补强板周边用角焊缝围焊，在补强板上预先开适当的孔或槽进行塞焊或槽焊，以保证补板与腹板贴牢。图 6.5-26d、e 是用一块翼板和两腹板构成“Π”形断面的弯梁。如果后面再加一块翼板即成封闭式箱形断面。

C形机身喉口转角处的结构，直接影响到机身的强度和制造工艺，应该根据实际需要和可能进行认真设计，图6.5-27提供翼板在该处的各种结构形式。图6.5-27a、b的设计不理想，焊缝均为工作焊缝，其尺寸必须通过强度计算来确定。而且焊缝正好处在水平翼板和垂直翼板90°交汇线的应力集中区上，其疲劳强度低，一般不用这两种结构，图6.5-27c为镶嵌结构，这里的角焊缝不承受主要载荷，可用较小焊脚尺寸。这种结构简单，加工和装配容易。但转角处仍为90°角，应力集中严重，所以只适用于小型压力机机身。图6.5-27d为整块翼板，在转角处折成两个大于90°的钝角，大大缓和了该处应力集中的程度，而且制作并不困难，是较为常用的结构。图6.5-27e是最理想的结构，随着R的增加，其应力集中随之降低，但是制造工艺较困难和复杂。如果采用像图6.5-26e的机身结构，在转角处腹板和翼板装配时两个圆弧要吻合是比较困难的。而该处的角焊缝工作时受到垂直焊缝轴线的附加拉力，是工作焊缝，对质量要求较高。图6.5-27f、g是当水平翼板和垂直翼板厚度不同时可以采用的结构，其共同特点是转角处为圆弧，焊缝避开应力集中区。

如果采用图6.5-26d的机身结构，两腹板喉口边缘拉应力最大，因而腹板喉口转角处都应加工成R较大的圆弧半径，且表面尽可能光滑。

在喉门转角处有圆弧，工作时在该处的焊缝和翼板受到垂直焊缝轴线方向较大的拉力，常在该处用肋板局部加强，如图6.5-26b、d、e所示。

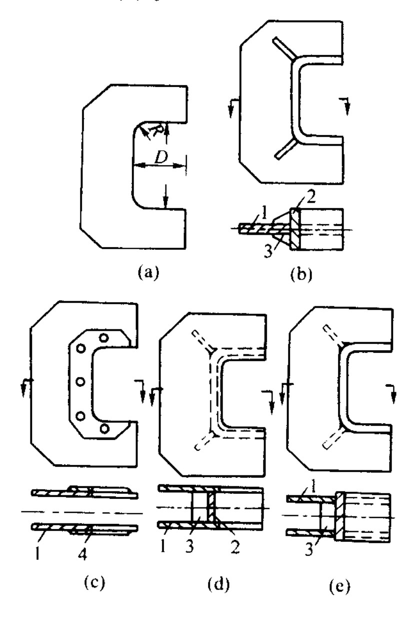


图6.5-26　压力机C形机身喉口边缘加强措施
1—腹板；2—翼板；3—肋板；4—补强板

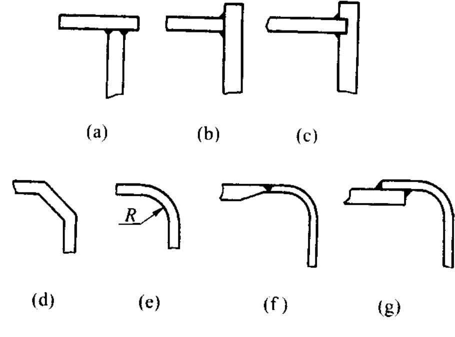


图6.5-27　C形机身喉口转角处翼板的结构形式

为了保持两腹板之间的距离和总体结构的稳定，在腹板之间应设置一些起支撑作用的连接杆或连接板，如图6.5-28所示，图6.5-28a、b适用于两板之间的距离较小，无法在内部施焊的情况；当两腹板距离较大时，宜用钢管或型钢作连接杆（见图6.5-28c）。

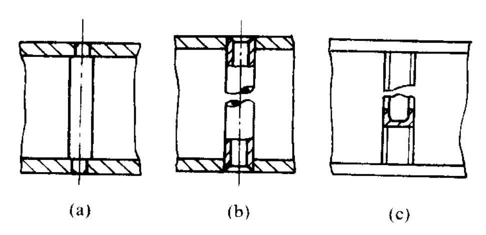


图6.5-28　压力机机身两腹板之间支撑的连接结构

工作台与下面起支承作用的腹板连接，使用丁字接头。如果工作台和腹板之间接触不良，如图6.5-29a所示，则两角焊缝须传递工作压力而受剪切，需用较大的焊脚尺寸。如果预先加工两接触面，保证工作台上的压力直接从接触面传到腹板上，则焊缝变成联系焊缝（见图6.5-29b），其焊脚尺寸可减到最小。为了增加工作台的支承刚性，在两腹板之间布置适当的垂直肋板，构成刚性支座。

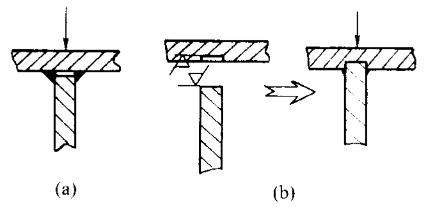


图6.5-29　传递压力的丁字接头设计

4.3　框架式机身的焊接结构

由上、下横梁和左、右立柱焊接成矩形框架的压力机机身，应按静不定问题求内力，然后进行强度和刚度计算。梁和柱的断面形状及它们之间的连接结构，对整个机身工作性能影响很大。

整个框架可以全部由钢板构成，也可以型钢和钢板或者铸钢和钢板构成。

全部由钢板焊成的框架机身，其梁和柱的断面，开式的多为“Π”形，闭式的多为矩形。工作中有偏心载荷而产生扭矩情况下，宜用闭式断面。当上、下横梁内部，需安置其他机件而无法采用闭式断面时，可以适当加大板厚和适当布置肋板，以加强整体或局部的刚性。

整体式框架结构中在内侧四个转角处，也和C形机身一样，是应力集中区。该处的结构设计可以参照图6.5-27所示的结构形式。

框架的前后立板（即腹板），最好从整块钢板精割出来。如果由于板料小或为了提高材料利用率，需由若干块板料拼焊而成时，拼接缝的位置要避开转角处，如图6.5-30a所示。当立板厚度大，供货有困难时，可以用若干块同质钢板叠焊成所需的厚度，但必须使每块板平整贴合，如图6.5-30b所示。

中小型压力机框架机身的立柱，可以选用工字钢或槽钢，以减少焊接工作量和简化制造，这种由型钢和钢板组合的框架的主要问题是上下横梁的腹板如何与型钢连接。最简单的是腹板与型钢的翼板搭接，这时角焊缝为工作焊缝。图6.5-31是Y71—100塑料液压机框架机身的结构。该机为了改善转角处D的应力集中，不采用图6.5-31a所示的简单结构，而是用图6.5-31b的结构。搭接的角焊缝避开转角处，在转角处的腹板上作出圆弧过渡。图6.5-31c是更为理想的



结构，因把搭接接头改为对接接头，可以进一步改善该处应力集中情况。但是，这样做的加工成本要增加。

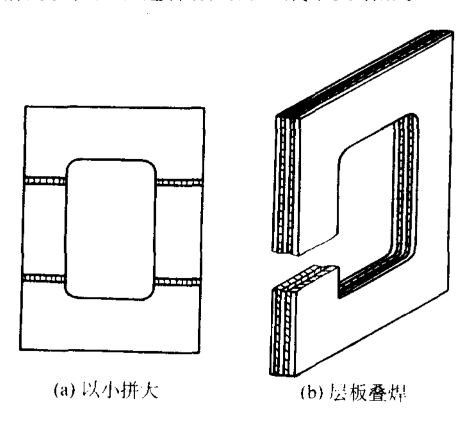


图 6.5-30　框架式机身前后立板的制备

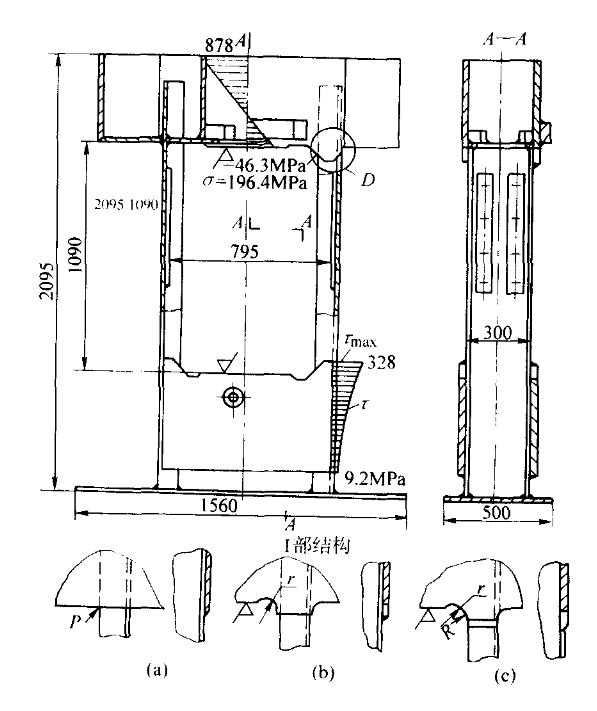


图 6.5-31　Y71—100 型塑料液压机框架式焊接机身

4.4　组合式机身的焊接结构

大型的机械压力机和液压机大量采用组合式机身，因为组成机身的上横梁、立柱、下横梁（或底座）、滑块或活动横梁等大件，可以分头单独进行制造，这样有利于组织生产和控制焊接质量，同时又解决整机运输上的困难。这些梁和柱采用什么样的结构，决定于自身的功能和它们之间的连接方式。特别是立柱，采用预应力结构（图 6.5-24）的受力情况和非预应力结构（图 6.5-25）是不同的，前者由于拉紧螺杆预紧力作用，在压力机工作之前和工作时均处于受压状态。后者在工作前基本上不受力，工作时主要受到拉伸。

组合式机身的梁和柱之间是机械连接，在连接的转角处，不存在应力集中问题。

（1）上横梁的焊接结构

1）机械压力机的上横梁　以框架拉杆式压力机上横梁为例，它既是一根梁又是一个减速箱体，因机械传动机构需安置在里面，所以必须设计成方箱形结构。工作时主要承受弯矩和剪切，偏心受载时还受到扭矩。在非工作时，横梁两端受预紧力而呈受压状态。

图 6.5-32 示出上横梁常用的外形和横断面结构形式。图 6.5-32a 腹板为单层壁结构，板厚由强度和刚度计算确定。这种结构简单，制造十分方便。图 6.5-32b 为双层壁结构，这种结构刚性大，质量因用薄板而大为减轻。但由于板壁减薄，在集中受载部位，如在轴承座周围或柱孔周围，须用肋板加强。因此，焊缝较多，制造较复杂。一般是在厚板供应有困难时或批量不大的情况下采用。

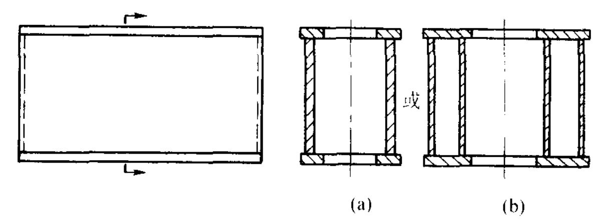


图 6.5-32　压力机上横梁的基本结构形式

在拉紧螺杆穿过的部位，总处于受压状态，需局部加强。通常使用隔板构成与立柱断面相适应的方形断面结构，图 6.5-33 示出两种纵剖断面的结构。图 6.5-33a 为双层壁结构，图 6.5-33b 为单层壁结构。此外，上盖板适当加厚。通常上盖板中部需开孔。对于大型压力机的上盖板，可以采用厚度不等的钢板拼焊，达到合理使用材料和减轻质量的目的。这时，要避免采用图 6.5-34a 所示的结构，而应采用图 6.5-34b 的焊缝少、焊接变形易控制、接头避开应力集中区的结构。

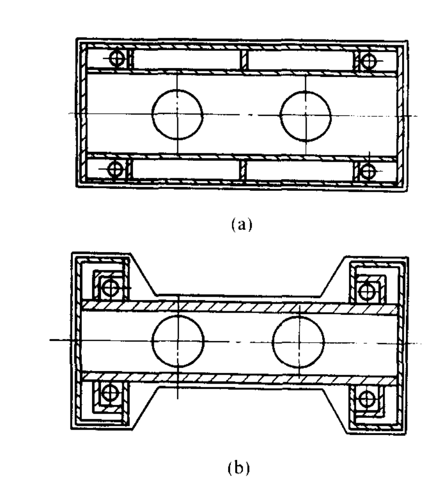


图 6.5-33　上横梁柱孔处的结构

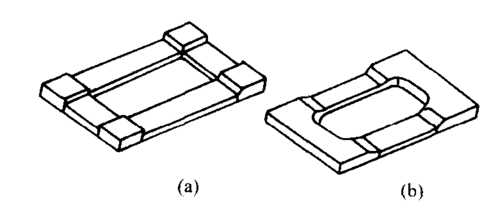


图 6.5-34　不等厚的横梁上盖板拼焊结构

在复板上需开孔安装轴承座。本章第 2 节表 6.5-1 提供各种装焊轴承座的结构。图 6.5-35 为两种机械压力机焊接上横梁的实例。图 6.5-35a 前后墙为双层壁的箱体结构，壁板较薄，轴承座之间用肋板相连，图 6.5-35b 为单层壁箱体结构，壁板厚度大。轴承座的附加板是从厚钢板切成毛坯焊到壁板上，采用很小的坡口焊缝连接。此外，压力机横梁工作时，可被视作盛油箱，底板以上 150 mm 范围内的焊缝不得渗漏，施焊工艺及检验规程都应对此提出明确要求。

(a) 腹板为双层壁的上横梁

(b)腹板为单层壁的上横梁

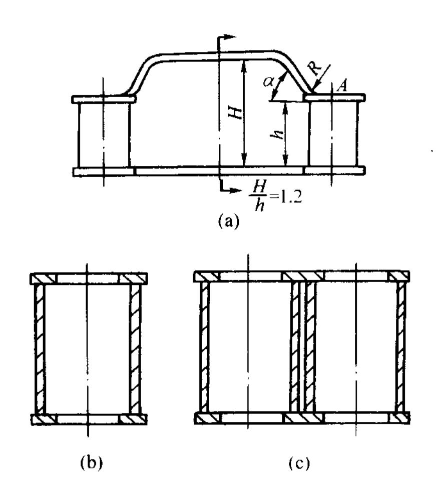
图 6.5-35 机械压力机上横梁焊接结构

2）液压机的上横梁　以图 6.5-24 所示的三梁四柱式液压机的上横梁较为典型。该梁中部须安装缸体，两端有柱套（立柱孔），它与圆形立柱用内外螺母连接。工作时主要承受弯曲和剪切，偏心受载时有扭转，因此，多设计成箱形结构。重型液压机多用等强度梁以节省材料和减轻结构质量。这时梁的中部高度 H 大于两端柱套处的高度 h，如图 6.5-36a 所示。在过渡区（图中 A 点）有应力集中，设计时应尽量使倾角 α 小些，而过渡圆弧半径 R 大些。大型液压机建议采用 $H/h=1.2$，小液压机尽可能用等高梁，即 $H/h=1$。中部横断面的结构按液缸数目和排列方式而定。图 6.5-36b 适用于单缸和三缸液压机；图 6.5-36c 用于多缸双排的液压机，中复板的数量视材料供应情况，可以是一块或多块叠成。在柱套和安装缸体处，宜设计成圆筒形或方形的结构，其中圆形最理想，它可以保证安装的接触面上有均匀的刚度。图 6.5-37 示出重型液压机几处电渣焊的柱套结构形式，其中图 6.5-37d 是采用铸钢（ZG230—450H）。使焊缝减少，外形过渡平滑，有利于减少应力集中。缺点是焊接面需机械加工，质量较大。

柱套两端与螺母接触的面以及上横梁与工作缸凸肩（法兰）接触的面均需机械加工，如果考虑到维修时，常需重新车削该表面，则应设计一凸台。图 6.5-38 示出柱套孔两端面处理方法，图 6.5-38b 是设置凸台的结构，其高度一般为 10～20 mm。

在圆筒形的缸套或柱套周围应适当加肋以改善力的传递和增加局部刚性。肋板布置有图 6.5-39 所示两种基本形式，推荐选用呈放射状布置（见图 6.5-39b）传力更合理，是抗扭性能好的形式。





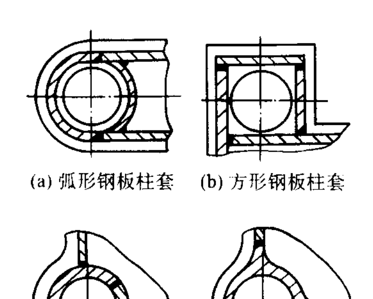


图 6.5-36 三梁四柱式液压机上横梁断面基本结构[37]

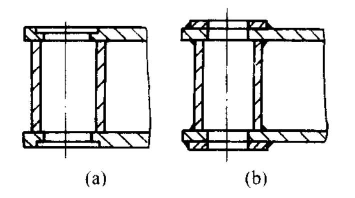


图 6.5-38 柱套或缸套凸肩的设计[37]

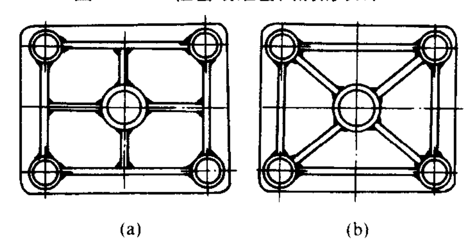


图 6.5-39 液压机上横梁柱套和缸套之间肋板的布置

图 6.5-40 是三缸液压机上横梁的焊接结构。结构简单，肋板布置合理，整体和局部刚性好。

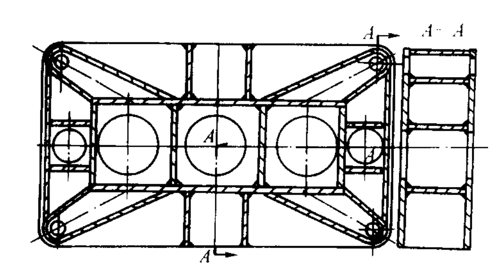


图 6.5-40 三缸液压机上横梁焊接结构

(a) 弧形钢板柱套 (b) 方形钢板柱套

(c) 圆形钢板柱套 (d) 铸钢件-钢板柱套

图 6.5-37 液压机横梁柱套的电渣焊接结构

图 6.5-41 是 120 MN 水压机上横梁的焊接结构，采用电焊渣焊接，焊后进行正火处理。

图 6.5-42 是 20 MN 的框架拉杆式油压机上横梁的焊接结构。放置缸体部位的结构设计简单合理，易于制造。

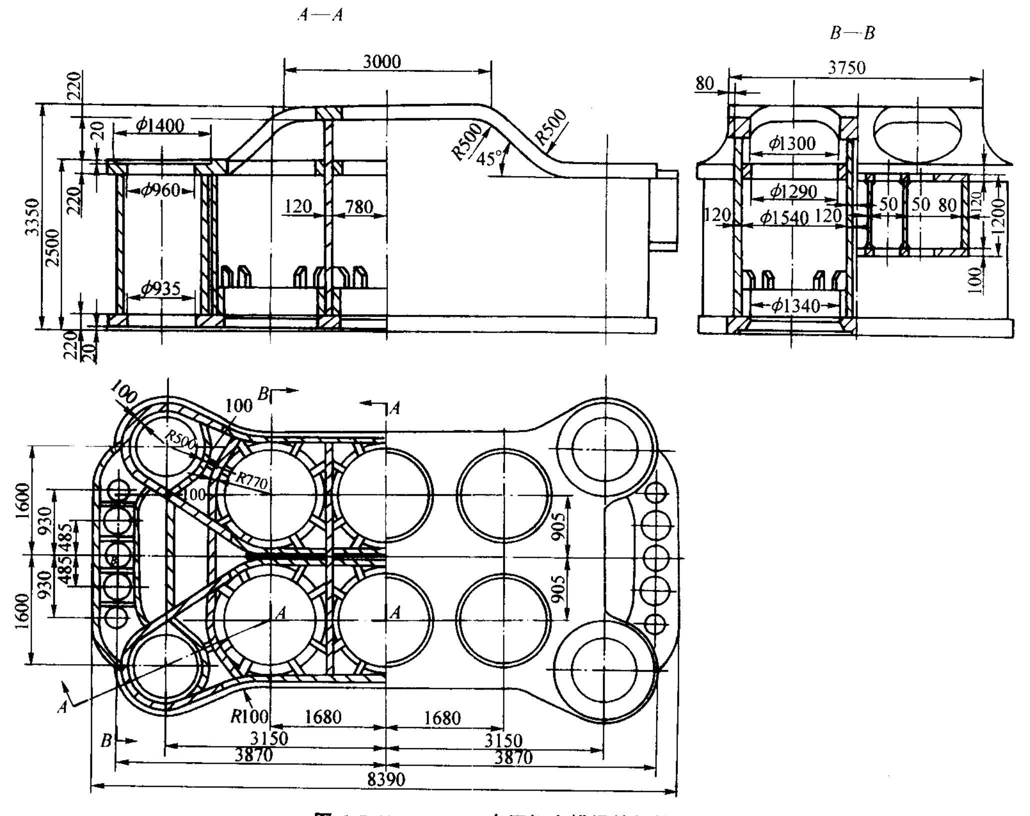


图 6.5-41 120 MN 水压机上横梁的焊接结构



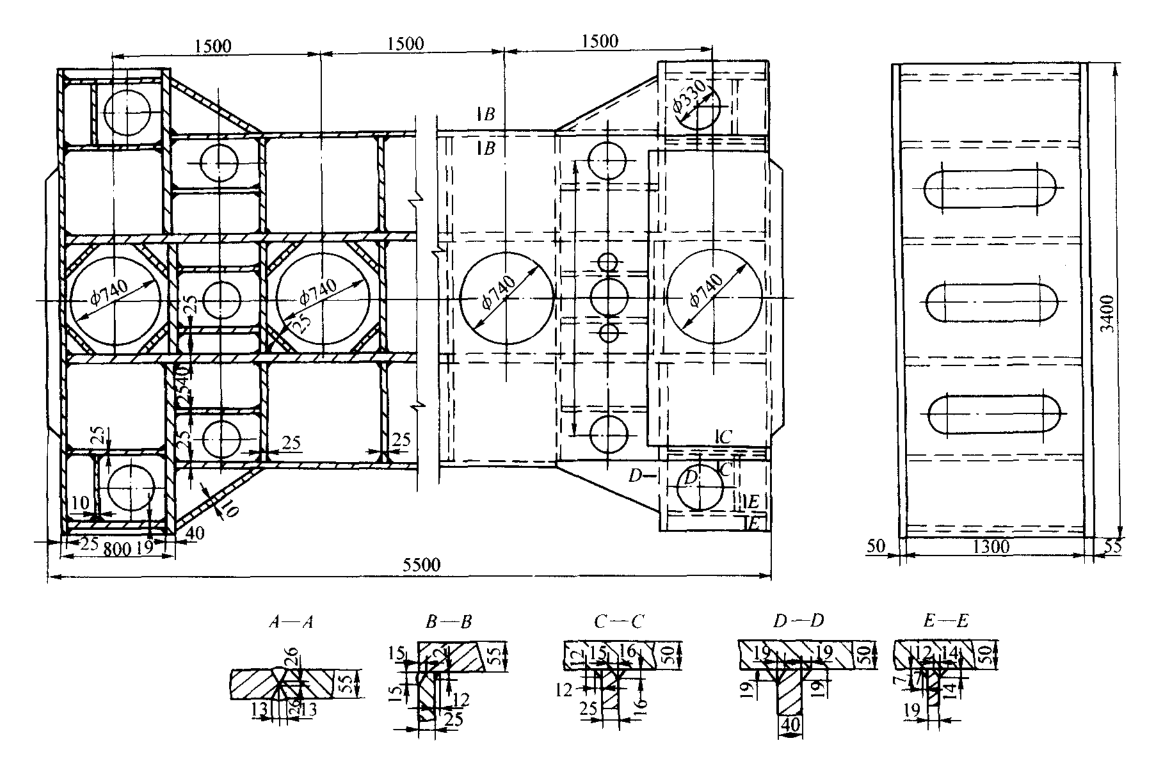


图 6.5-42　20 MN 框架拉杆式油压机上横梁焊接结构

(2) 下横梁的焊接结构

1) 机械压力机的下横梁　框架拉杆式压力机的下横梁可以看成由一根主梁和两根端梁组成的压力机底座。主梁上面安置工作台板，内部安放气垫装置。因此，需采用箱形结构，其上下盖板需开孔。图 6.5-43 所示是其断面的基本结构形式。大型压力机下横梁的主梁常作成高度不同的等强度梁，即中部高度大于两端，或上、下盖板做成中部厚而两端薄的结构。目的是减轻质量和节约材料。

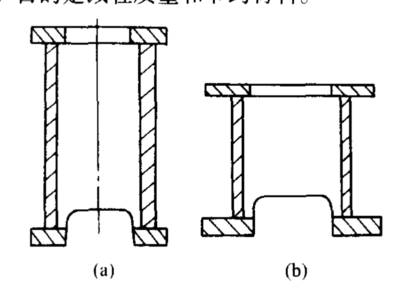


图 6.5-43　机械压力机下横梁断面基本形式

端梁上面通过拉杆与立柱连接，下面作为整机的支座安放到基础上。因此，端梁的刚性要求高，一般采用箱形结构。

设计下横梁时要注意：作为主梁的两块腹板是主要承载构件，它必需贯通整个下横梁，不要被端梁的复板隔断，见图 6.5-44 所示；立柱孔的位置主要由柱距决定，只要可能，应使立柱孔靠近主梁腹板，并在孔周围加肋；与基础连接的支座部位，要适当用肋板加强；上盖板中部需开孔，厚板时一般不是用整板切割成形，而是采取大厚度平板拼接成所需形状，如图 6.5-45 所示。拼焊时，要注意焊接变形控制。厚板发生变形，其矫正十分困难。通常设计 K 形或双面半 U 形坡口对接接头，正反两面交替施焊。厚度不同的板对接焊时，按板厚差 3～4 倍的长度内对厚板削薄，使之成等厚对接，如图 6.5-34b。

图 6.5-46 所示为两台重型机械压力机下横梁焊接结构。两者基本构造相同，主梁两腹板和上下盖板均为厚板，主要焊接接头的焊缝并不要求全熔透。图 6.5-46a 的工作压力比图 6.5-46b 的约大 1/3，但由于工作台长度比较短，所以板厚反比后者的小。支座的结构略有区别。

2) 液压机的下横梁　三梁四柱式液压机的下横梁也是整个机器的底座，工作时承受机器全部载荷和质量。梁面上安放工作台，梁内通常设有顶出缸或其他辅助装置，所以多采用箱形结构。其刚度要求较为严格，内部常加肋以构成箱格结构。

图 6.5-47 所示是小型液压机的下横梁。四个柱套和顶出缸套为铸钢件，相互间用肋板联系和加强。

图 6.5-48 所示是中等型号液压机下横梁的焊接结构，内部用纵、横肋形成箱格结构。在上、下盖板的中部，采用较厚的钢板。柱套的结构简单。

图 6.5-49 所示是重型液压机下横梁，采用电渣焊焊接的结构。

(3) 滑块体的焊接结构　滑块是机械压力机上作往复运动的部件，结构较复杂，精度要求高。它的上部安装连杆及调节装置，下部固定模具，中间安装保险装置和顶料装置等。

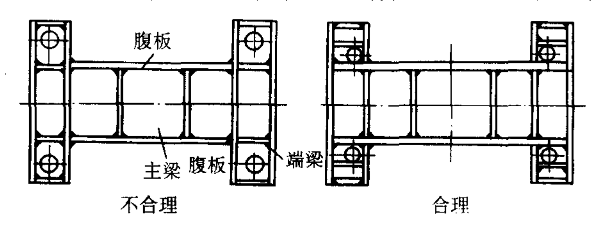


图 6.5-44　机械压力机下横梁腹板的设计

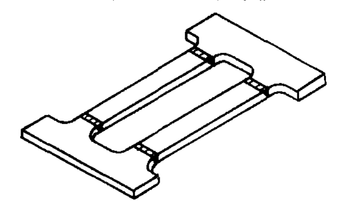


图 6.5-45　机械压力机下横梁盖板拼焊结构

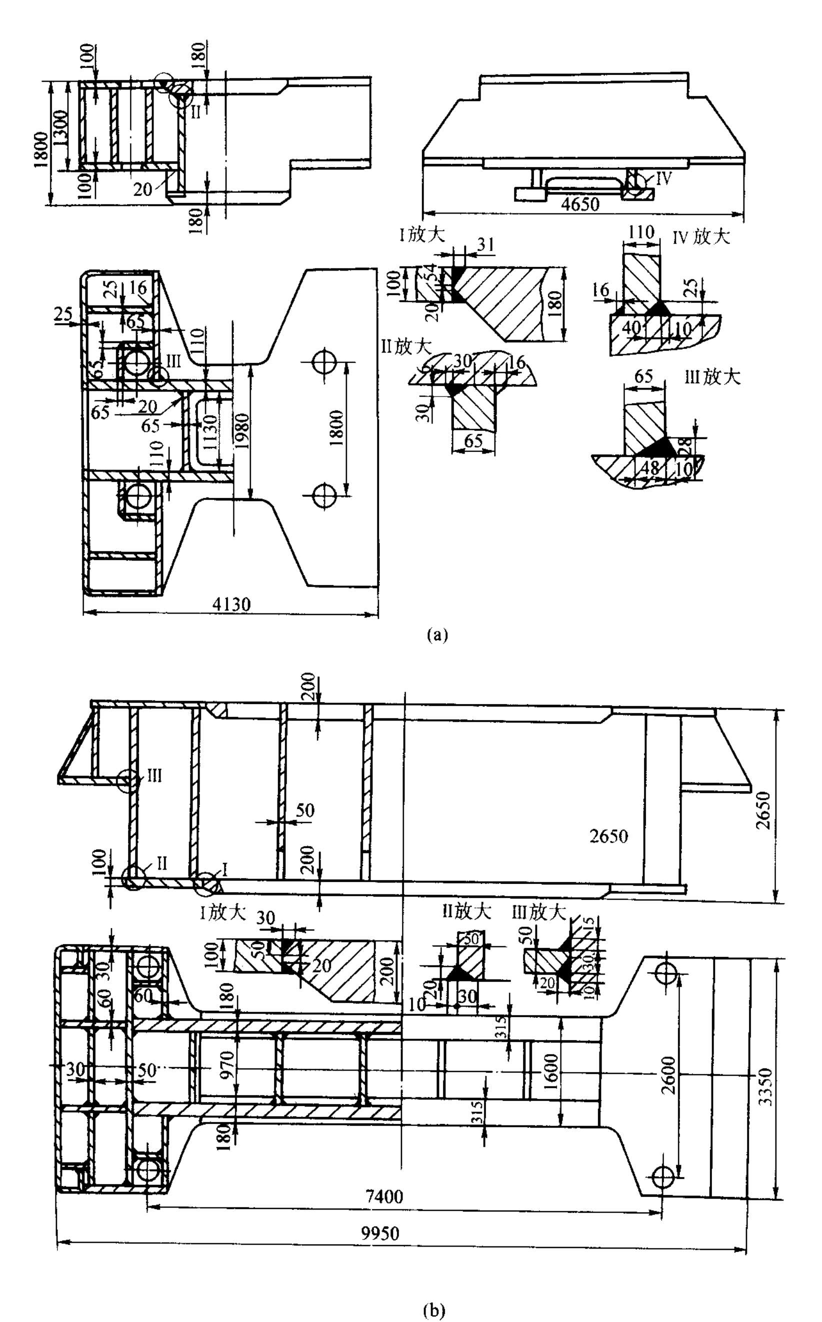


图 6.5-46 机械压力机下横梁典型实例

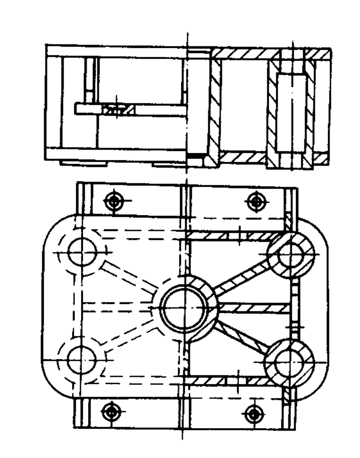


图 6.5-47 小型液压机下横梁焊接结构

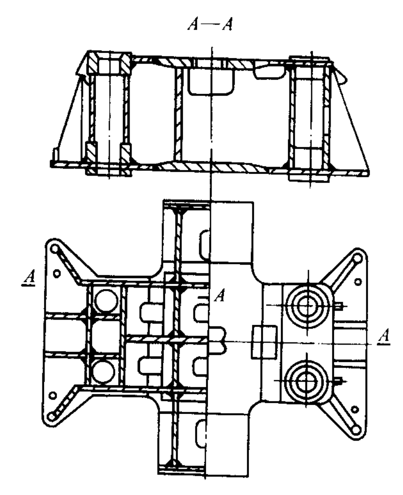


图 6.5-48 具有箱格结构的液压机下横梁

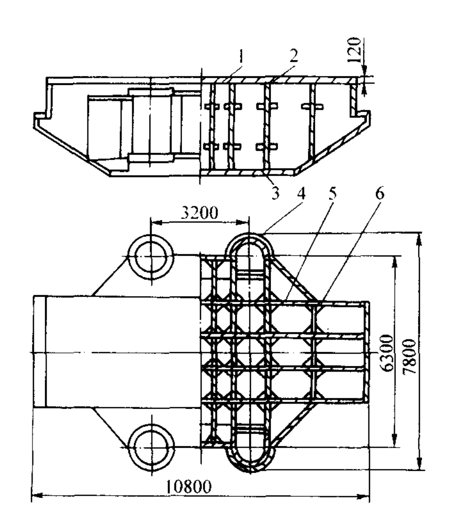


图 6.5-49 重型液压机下横梁电渣焊接结构

1—隔板；2—上盖板；3—下盖板；
4—柱套；5—腹板；6—肋板

闭式双点压力机的滑块体在工作时，可看成是受均布载荷的双支点梁，通常设计成箱形结构。在构造设计时要注意：合理地布置箱内各种机构，尽量使整个滑块部件的重心和滑块体的几何中心重合；箱体具有足够的导向长度以保证滑块行程有好的垂直性和高的工作精度；在保证强度和刚度前提下合理地确定箱体的截面尺寸和肋板的位置；尽量减轻滑块的质量。

与连杆接连的支点部位，作用有集中载荷，要适当加强。若构造复杂，施焊困难时，该部位可以采用铸钢件，材料用ZG230—400H或ZG370—500H等。此外，该处应有防渗漏要求等。

导轨板与箱体壁板的连接有各种结构形式，图6.5-50中示出常用几种，图6.5-50a是导轨板镶焊在滑块体内，与壁板直接焊在一起。图6.5-50b是导轨板凸出在滑块体之外，需设置支撑板。为提高支承刚性，用肋板加强。图6.5-50c的导轨板是铸钢件，这样装配和焊接既简单也方便。目前，比较先进的压机多采用直导轨。

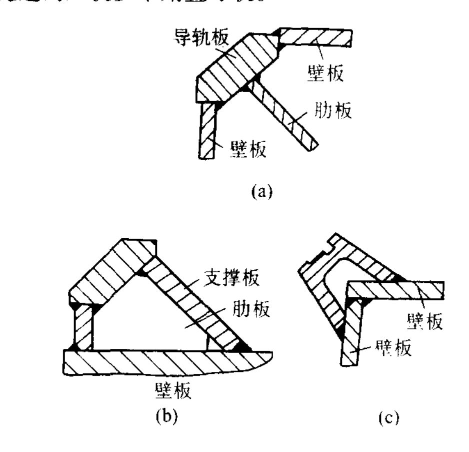


图 6.5-50 导轨板与滑块体连接的结构

图6.5-51示出两种型号不同的机械压力机滑块的焊接结构。图6.5-51a为小吨位压力机的滑块体，腹板厚度较薄，上部无盖板，易失稳，故在腹板上缘用槽钢加强。图6.5-51b为长度较大的重型压力机滑块体，下部采用较厚的钢板，因此结构设计得比较简单而刚性很大。

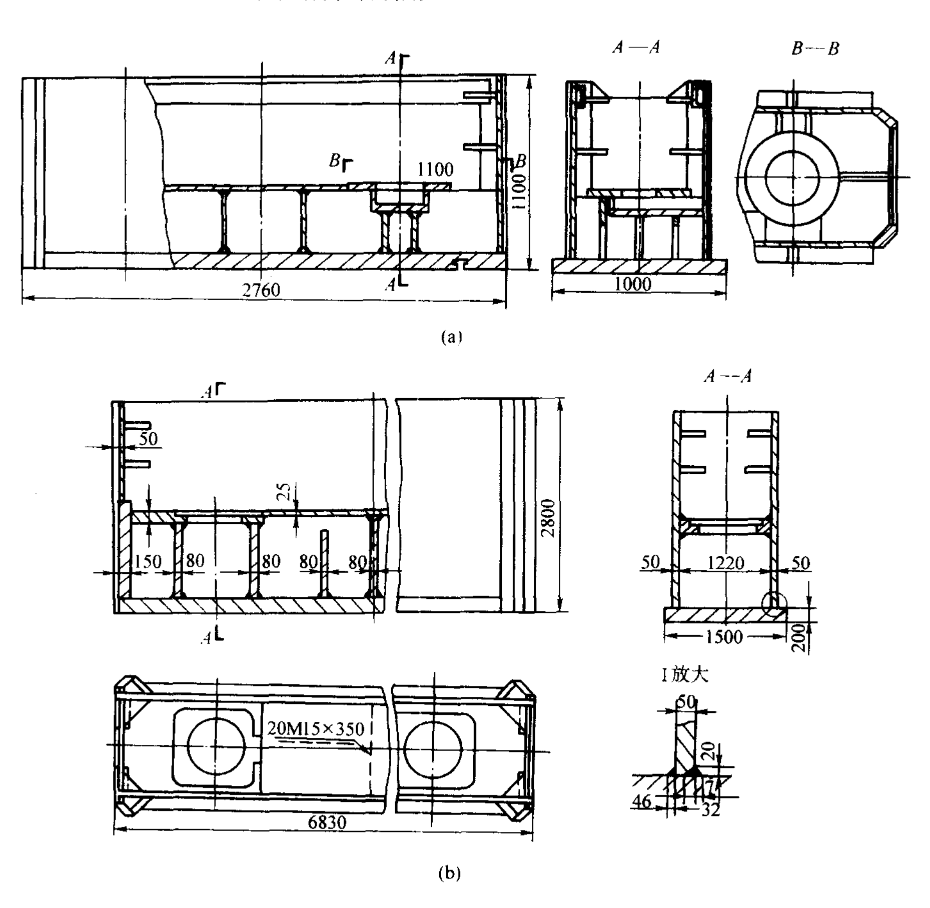


图 6.5-51 机械压力机滑块体的焊接结构



(4) 活动横梁的焊接结构 活动横梁是三梁四柱液压机重要部件之一，它的主要作用是：上面与液缸活塞杆（柱塞）连接以传递液压机的压力；通过自身的柱套以立柱导向作上下复运动完成工作，它下面与砧块或模具连接。设计活动横梁的焊接结构时要考虑：所用材料与上下横梁相同；如果在工作时无任何弯矩，可按承压能力来设计，但当使用中有一定偏心载荷，就不仅仅要具有足够的承压强度和刚度，而且还应具有抗弯能力。小型液压机可设计成开式箱形结构，大型液压机多为闭式箱形结构。在与工作柱塞相连接部位要加强，一般把柱塞下面的支承设计成厚度较大的圆筒或方形结构。在其周围设置适当肋板。

活动横梁上的柱套高度愈大，则导向精度愈高。一般情况下不应小于活塞行程的 1/2，约为立柱直径的 2.5～3.5 倍。

大型液压机活动横梁的结构要按工作缸的数量与排列而定。图 6.5-52 所示为 120 MN 水压机活动横梁的焊接结构，该机有 6 个工作缸，双排排列。图 6.5-53 为其横断面结构，采用80～120 mm钢板用电渣焊接成整体。

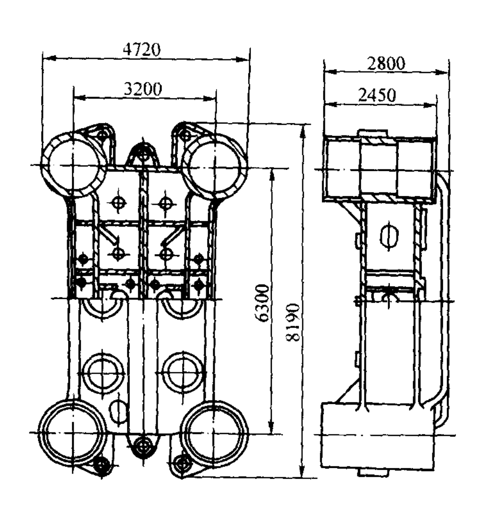


图 6.5-52 120 MN 水压机活动横梁焊接结构

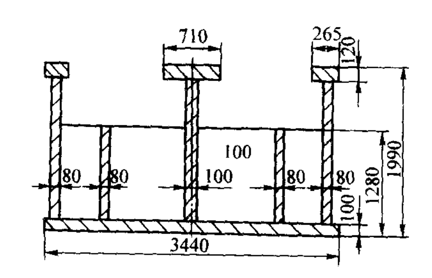


图 6.5-53 120 MN 水压机活动横梁断面结构

(5) 立柱的焊接结构 对于预应力拉杆组合机身的立柱，始终处在受压状态。在压力机没工作之前，立柱就承受着最大的压应力。因此，立柱必须满足预应力作用下的强度、刚度和稳定性的要求。

柱子的数量有设计成 4 根或 2 根的。前者是在工作台面积大，即柱距很大时采用；后者是侧面两根柱子的柱距较小而合二为一，这样做刚性好。

此外，目前比较流行的压力机将空气管路、润滑及回滑管路、电气管路等统统包揽在立柱体内，形成全封闭（管子）结构，为立柱的焊接制造带来一定难度。

对于大型压力机立柱的断面形式主要是箱形结构，4 柱的是近方形，2 柱的为长方形。为了防止整体和局部失稳，在拉杆附近的钢板要适当增加厚度，同时沿柱长方向按一定间隔设置横肋。

箱形结构的柱子，当尺寸小时，柱内横肋板的焊缝有一面无法施焊。这时，建议在较薄的壁板上与横肋板对应处开槽，最后装配并与肋板槽焊。

目前，较先进的压机带有上气垫结构，使立柱细而长。此时，拉紧螺栓护板应采用压弯板结构，减小因搭接焊缝造成的变形影响，同时，合理的装焊顺序也很重要。

图 6.5-54 为四柱机械压力机中一根立柱的焊接结构。在长方形断面内套一小方形断面，使拉杆附近有较强的刚性。该结构采用两个压弯板，既减少零件数，又减少焊接工作量和焊接变形，装配工作也简单方便。导轨处可以采用插入式，见图 6.5-55，这样导轨刚度会更好。

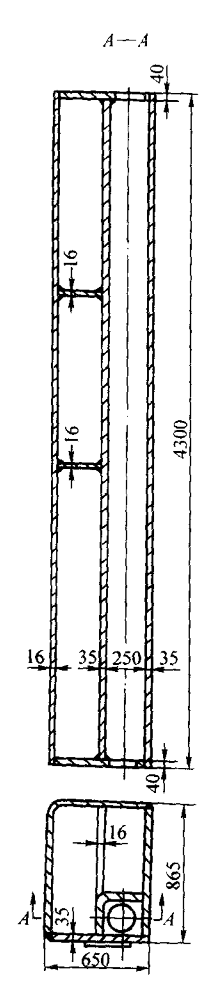


图 6.5-54 J39－630 型机械压力机焊接立柱

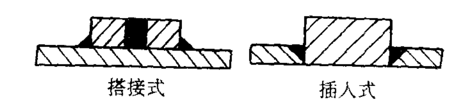


图 6.5-55 导轨与柱壁的焊接结构

图 6.5-56 是双柱机械压力机中左立柱的焊接结构，在两拉杆附近用纵向肋构成方形断面，以提高局部刚性。沿柱高每隔一定间距需用横肋提高板壁的稳定。

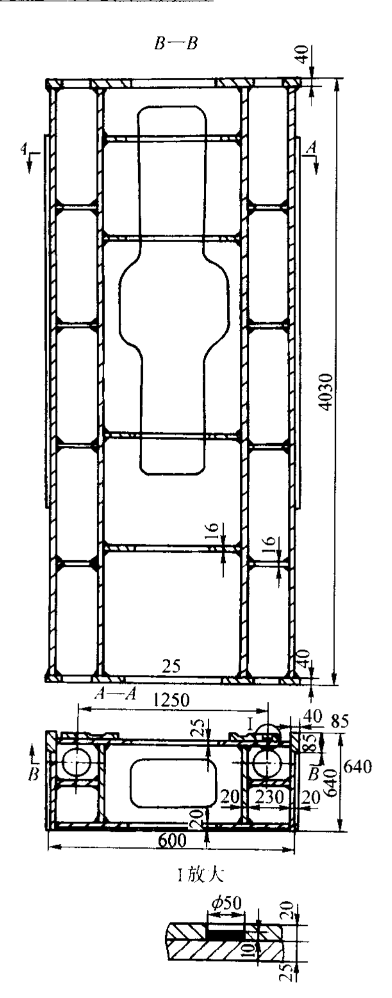


图 6.5-56 JD36－400 型机械压力机焊接立柱

5 柴油机机体焊接结构

5.1 机体的工作特点及其设计要求

柴油机属动力机械，是内燃机之一。按其转速和活塞平均速度可分为高速、中速和低速三种。中、高速柴油机属于筒形活塞式柴油机，其特点是活塞直接与连杆相连，活塞的导向和侧推力由活塞的裙部来承受；低速柴油机则属于十字头式，活塞通过活塞杆及十字头而与连杆相连接，活塞的导向和侧推力由十字头来承受，故其机体需有滑枕（即导滑板）。

柴油机的主体是机体。它的作用是，在汽缸盖和运动件之间构成力传递的环节，形成一个密封的容纳运动件的空间，并作为其他零部件的支撑骨架。机体一般由汽缸体、机架（即曲轴箱）和机座组成。对于中高速柴油机，为进一步减轻质量，可将缸体、机架和机座合成一体。或整体浇铸或制成铸－焊结构，使之成为整体式机体；而低速柴油机的机体因体积大，故采用分离式结构。目前，大功率柴油机（缸径 $D \geqslant 200$ mm）的机体采用焊接结构已越来越多，因焊接的机体具有结构紧凑、质量轻、强度高和刚性大等优点。

柴油机是产生动力的机械，工作时机体受力复杂，不但承受着零部件的质量，而且还承受着大小和方向作周期性变化的燃气压力、运动件的惯性力和扭转力矩等的作用。因此，在进行机体焊接结构设计时，除应满足机体本身的特殊要求和柴油机使用条件外，还必须保证机体有足够的强度、刚度和形位尺寸精度。考虑到焊接工艺和焊接结构的特点，尚应注意以下各点。

1）根据柴油机用途、汽缸数和排气方式，合理地设计机体的构造形式。

① 对于中、高速（即筒形活塞式）柴油机，可将其汽缸按V形排列布置，把机体设计成Y形；对于低速（即十字头式）柴油机，其汽缸直线排列布置，把汽缸设计成I形。

② 为了使机体结构紧凑、简单、强度高和刚性大，而且质量轻。应尽量采用封闭的箱格结构。局部强度和刚性可通过增加壁厚、使用部分铸钢件或适当加肋等措施加强。

③ 机体的接近性要好。需便于各种零部件的装拆、搬运和维修。

④ 必须保证机体尺寸的稳定性。机体焊后应进行消除残余应力处理。

2）为了保证机体的疲劳强度，应保持结构连续，避免应力集中。

① 机体上的纵向构件原则上应自首至尾连续贯通；机体壁厚应无急剧变化。当厚度不同的板材对接时，板厚差超过 2 mm 时，较厚的板边要削斜，其斜度一般取 1:3～1:4。

② 按最合理的受力情况设计结构形状。尽量使力的传递沿着较短的路径较均匀地分散；改变力流方向，以避免应力过分地集中于某局部区域。

③ 避免构件内各种焊缝过分集中和相互靠得太近。一般情况下，焊缝间距应不小于 100 mm，当两条焊缝必须相交时，应尽可能布置成直角相交，避免形成小角度斜交。

3）保证结构的工艺性和经济性

① 选用焊接性能好、价格便宜的钢材，钢板可选我国的船用结构钢 D 级，当板厚 $t \geqslant 14$ mm 时，应选用正火钢板；铸钢件可用 ZG200—400H 或者 G230—45H。

② 尽量采用轧制型钢代替钢板切条或组焊型材，以减少备料和焊接工作量。

③ 要根据工厂所用的焊接方法和工艺来设计焊接接头，避免设置难施焊或难检验焊缝。对需要背面清根的焊缝，需考虑碳弧气刨的可能性和方便性。

④ 根据强度要求和工艺需要确定角焊缝的焊脚尺寸，不应随意加大；要考虑不同焊接方法的熔深，以节约焊接材料，减少焊接变形；承受较大应力的角焊缝，当其焊脚尺寸大于6 mm时，宜采用开坡口的角焊缝，因这种部分熔透的角焊缝既可减少填充金属又可改善焊接接头中的应力流。

此外，船用柴油机机体的结构设计还应满足其入级的船舶检验局（或船级社）的规范要求。

5.2 低速船用柴油机机体的焊接结构

低速船用柴油机属于十字头式柴油机，其功率一般为 1 000～7 000 kW，汽缸直径为 420～960 mm，质量一般为 28～1 900 t。这里介绍国内已生产的低速船用柴油机中的一种机体。该机体为I形结构，由机座、机架和缸体三部分通过贯穿螺栓把紧而组成的刚性体。机座为铸焊结构，机架为全焊结构，缸体为铸造结构。下面只介绍机座和机架的结构。

5.2.1 机座焊接结构

目前，低速柴油机焊接机座主要有 A、B 两种类别，各有优缺点。以 B 类机座更优，见图 6.5-57。该机座主要焊接接头的细部设计如图 6.5-58 所示。

铸钢件用 ZG200—400H，钢板用 D 级结构钢。

整个机座有如下特点。

1）工艺上是一个铸－焊联合结构。因主轴承座形状复杂并要求具有足够刚性，故采用铸钢件。然后再用钢板组焊成整个机座。这样制造工艺得到简化。

2）构造上是一个箱格结构。它由两侧的纵梁和带铸钢轴承座的横梁（其数量随汽缸数变化）组成。从而保证了机座具有极高的刚性和最小的外形尺寸，且有较好的抗振性能。

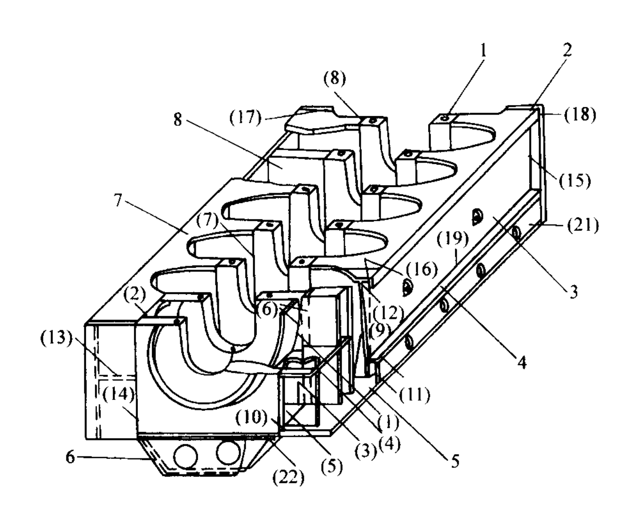


图 6.5-57　B类机座的焊接结构

1—轴承中间体；2—端板；3—侧板；4—地脚螺栓箱体面板；5—底板；6—接油槽；7—上面板；8—耳板
（本图机座为正放位置；括弧内数字为该处焊缝的焊接顺序）

3）带轴承座的横梁用两块耳板组成双层壁结构。具有足够的支承刚性。耳板与轴承座连接的接头在轴承座上开J形坡口，保证了单面焊熔透。

4）机座与机舱基础连接处设地脚螺栓座，且为一箱形梁结构，见图6.5-59。其刚性比直接在底板上开螺栓孔大很多。

注意，该箱形梁的面板（见图6.5-57中4）取得较厚（一般为55～80 mm），它与侧板3的连接为T形接头，见图6.5-58中（19）所示。若接头设计不合理和箱形梁焊接工艺不当，焊时产生过大的拘束应力，就会在侧板上发生层状撕裂。为此，采用了下面的措施；接头设计采用大小坡口，内侧坡口只焊两层；焊前上面板预留反变形，四周不点固，在自由状态下焊接；采用细丝（ϕ1.2 mm）CO_2焊和分段退焊法，尽可能降低焊接应力。

5.2.2　机架焊接结构

低速船用柴油机B类机架为全焊结构，如图6.5-60所示。钢板材质同机座。其主要焊接接头的细部设计见图6.5-61。

整个机架有以下特点。

1）和机座一样采用整体刚性和稳定性都较好的箱格结构。与机座相对应，在垂直纵轴方向上设有数个构造单元（其数量随汽缸数量变化），这些单元常称为A字架或机架单片，见图6.5-62。这数个A字架和侧板就组焊成了箱格结构。

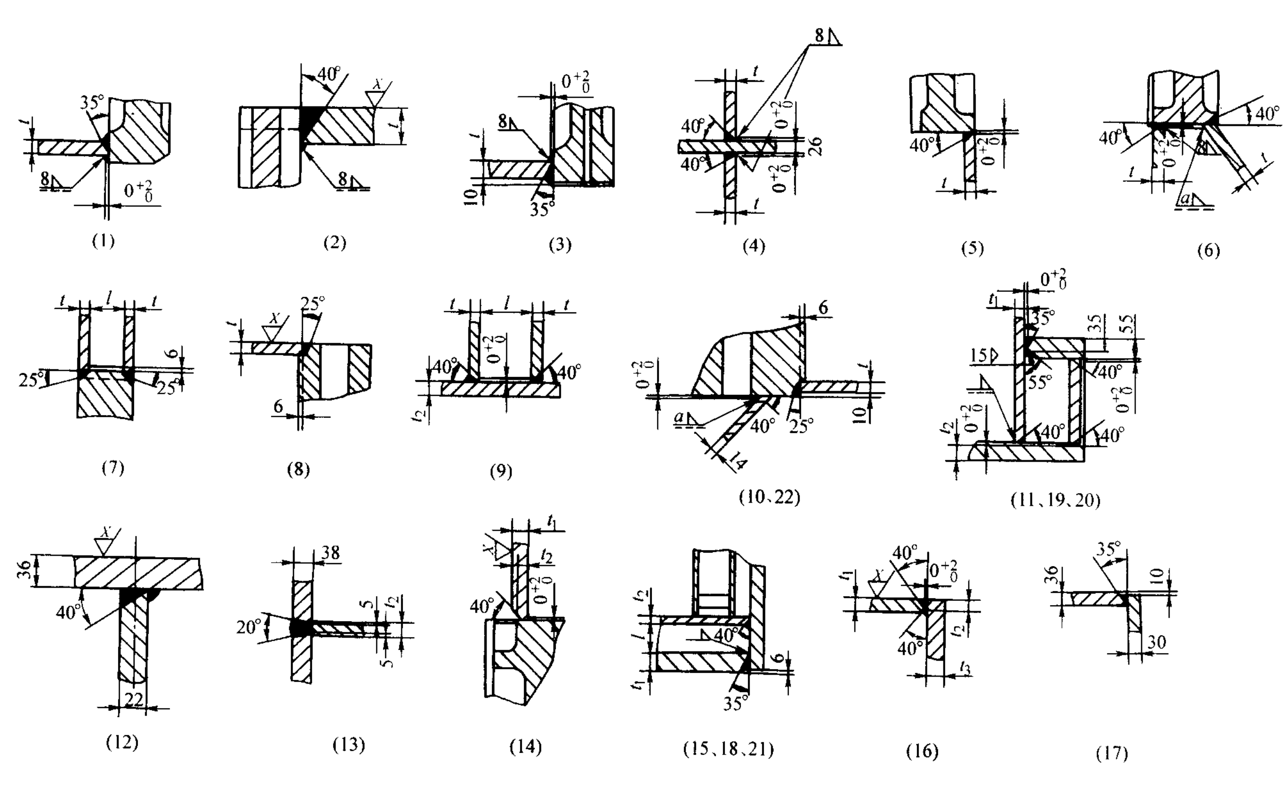


图 6.5-58　B类机座主要焊接接头的细部设计

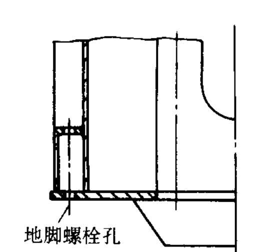


图 6.5-59　B类机座地脚螺栓位置的结构

2）A字架左右两端用两块三角板与导滑板及隔板组焊成箱形孔，供贯通的拉紧螺栓通过。工作时它相当于箱形柱，具有很高的抗压性能，而且制造工艺简单。

3）机架采用了厚度较大的导滑板，且背面有两块三角板构成双腹板的支撑，在工作中足以承受滑块对它很大的交变侧推力，提高了结构的抗疲劳性能和吸振能力。

5.3　机车用柴油机体的焊接结构

铁路内燃机车的动力装置是机车柴油机。它为机车提供牵引力，又为辅机提供动力。其功率一般为2.94～5.15 MW。机车用柴油机的显著特点是要在尺寸有限的车箱内，布置大功率柴油机及其附属装置。因此，要求柴油机结构紧凑，严格控制外形尺寸及质量。柴油机的汽缸呈V形排列，



属于筒形活塞式中速机。柴油机的机体为整体式 Y 形结构。

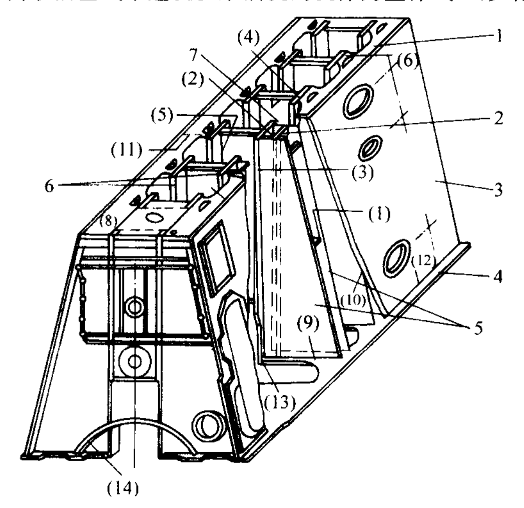


图 6.5-60 B 类机架的焊接结构

1—上面板；2—隔板；3—侧板；4—底板；5—双三角；6—导滑板；7—中间壁板（括弧内数字为焊接顺序）

过去机车用柴油机的机体是整体铸造结构，现已改为铸 - 焊联合结构和全焊结构。因为焊接结构的机体容易达到机车对柴油机的上述基本要求。这里介绍国产主型机车东风 4B 型机车的 16V240ZJB 型柴油机机体的焊接结构，见图 6.5-63。

该机体长 3 945 mm，宽 1 385 mm、高 1 288 mm、缸径 240 mm，加工后重 6.6 t。机体呈拱门式六边形，可分为上、下两部分。下部是主轴承，其形状复杂，壁厚变化大（20～120 mm）。因此，这部分采用铸钢结构，其材质为 ZG251 + RE；上部因是采用 V 形的机体结构，故设计成左右对称的由 Q345（16 Mn）钢板构成的箱形体。为了加强纵向强度和刚度，左右各用 3 块和机体长度相当厚度为 14 mm 的内侧板和中侧板，厚度为 30 mm 的外侧板。它们下面与主轴承座顶面焊接，上面与厚 73 mm 左右顶板焊接。为了保证焊透，内侧板和中侧板都预制成双面坡口。为了减少内、中侧板与顶板之间的板厚差，在顶板粗加工中，留出高度为 10 mm 的凸台，使两者由角焊缝变成对接焊缝，以降低接头的应力集中从而提高了焊接接头的疲劳强度，见图 6.5-64。

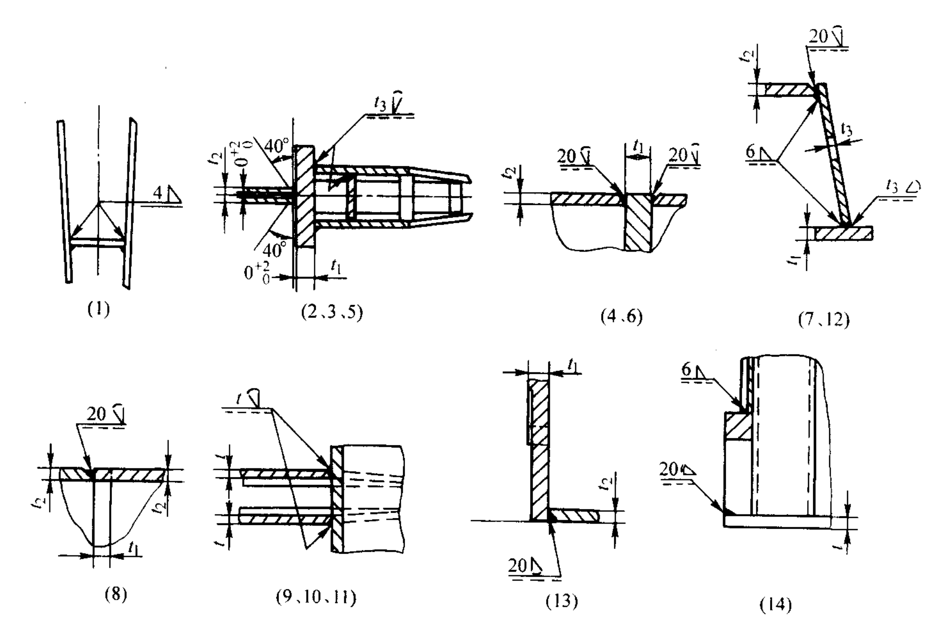


图 6.5-61 B 类机架主要焊接接头的细部设计

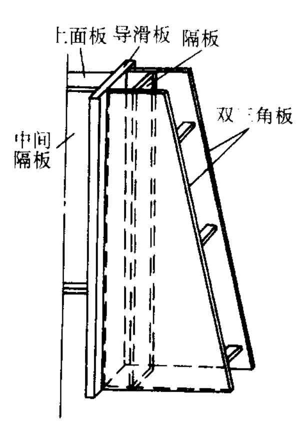


图 6.5-62 B 类机架中的 A 字架结构

内、外侧板之间有左、右对称的共 14 块厚为 16 mm 的垂直板（2）、（4）组成一个个箱格结构，加强了上半部构件的强度和刚性。两端各有一个厚度为 20 mm 与 22 mm 的整体垂直板（1）、（3），这些垂直板与纵中心线及底面垂直，下端与主轴承座顶面焊在一起。为保证焊透，垂直板的坡口都制成带钝边的双面 V 形坡口，并在每垂直板下面放上两块（2 mm × 5 mm × 30 mm）工艺垫板以保证间隙，见图 6.5-65。

为了保证各垂直板之间的间距和正确位置，又不切断各板而保持为整体，在与机体等长的厚度为 30 mm 的水平板、厚度为 16 mm 的支承板、中侧板和垂直板（2）、（4）上面各加工出一半的插装切口，再将左、右水平板和左、右支承板，各个隔板，插入垂直板，然后用双面角焊缝连接，这样构成了一个个箱格结构，增加了机体整个上半部的强度、刚度和吸振能力，见图 6.5-66。



在图 6.5-64 所示的左、右外侧板的四周均刨成 J 形坡口，然后与左、右顶板，各垂直板，支承板，隔板，厚度为 30 mm 的端板，主轴承座等焊接。这样机体上半部便形成左右对称的两个箱格体的焊接结构，用来安装柴油机的汽缸、配气机构和喷油机构。为把左右两个箱体结构连在一起，在两个箱格体之间，用与机体等长的厚度为 12 mm 的盖板与厚度为30 mm的中顶板（四周均开有坡口），分别与左右内侧板和左右顶板焊在一起，形成两个通道，作为润滑机油腔与排出废燃气通道。同时又把左右两部分的箱格体连成一个大的完整箱形体，见图 6.5-67。

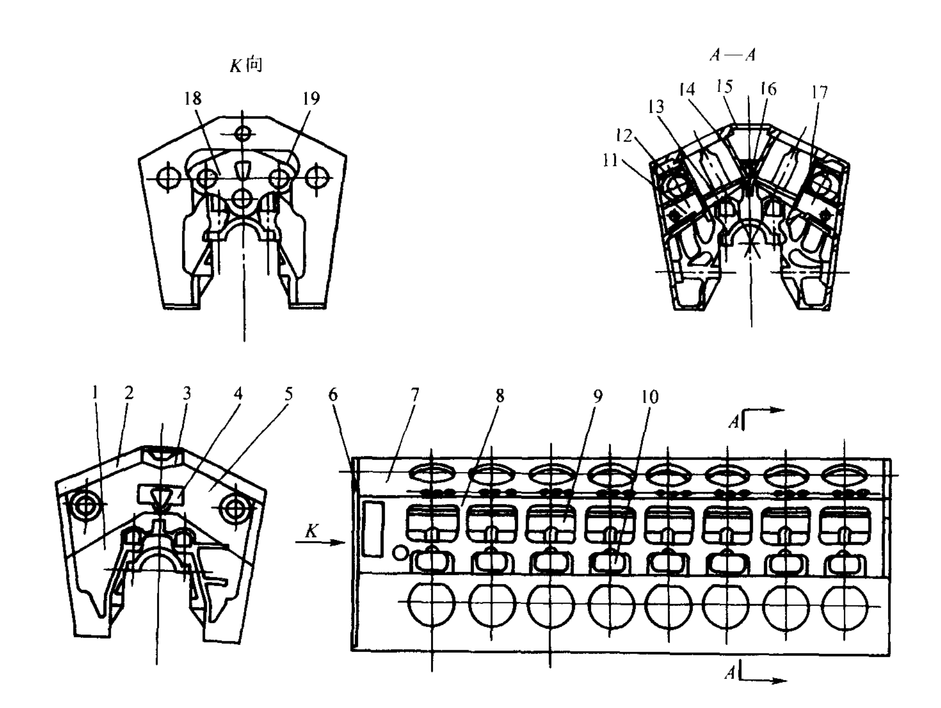


图 6.5-63　16V240ZJB 型柴油机机体

1—主轴承座；2、3—法兰；4—端盖座板；5—垂直板（3）；6—端板；7—左、右顶板；8—左、右外侧板；9—隔板；10—工艺盖板；11—垂直板（2）、(4)；12—左、右支承座；13—左、右水平板；14—左、右内侧板；15—中顶板；16—盖板；17—左、右中侧板；18—座板；19—垂直板（1）

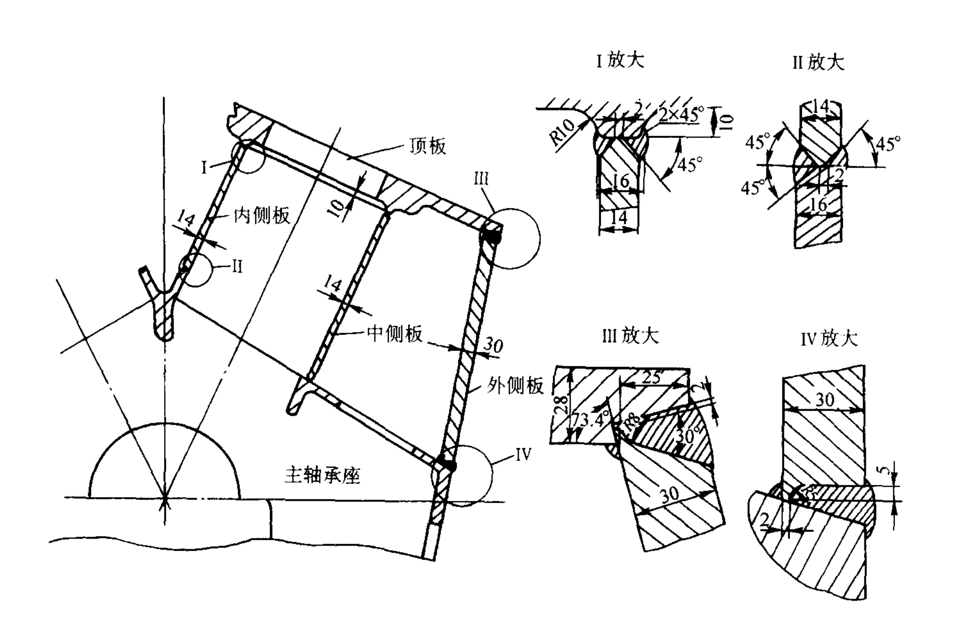
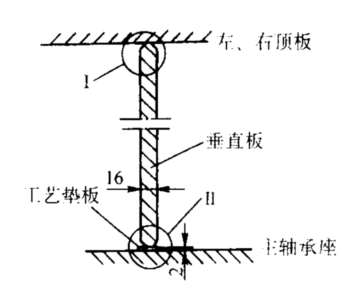


图 6.5-64　内、中、外侧板与主轴承座及顶板的焊接接头



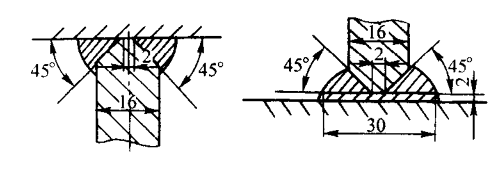


图 6.5-65 垂直板与主轴承座及顶板的焊接接头

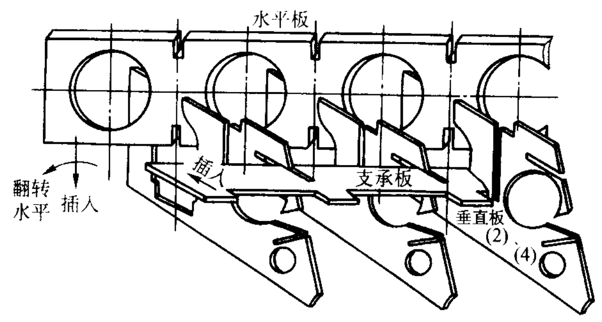


图 6.5-66 垂直板与水平板、支承板、内侧板、中侧板的组装焊接

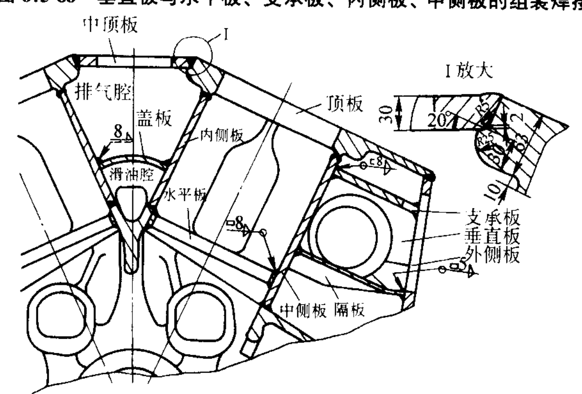
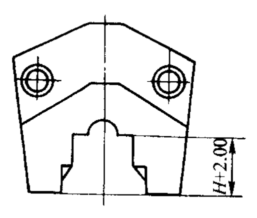
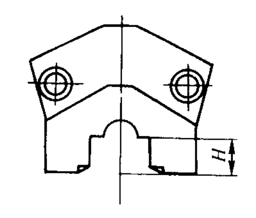


图 6.5-67 中顶板、盖板与顶板、内侧板的组焊

16V240ZJB 型机体是原 16V240ZJA 机体经改进后的机型。原 A 型机体在使用过程中曾出现过裂纹。原因是结构截面为八边 Y 形，上、下两大部分强度和刚度较差。经过将结构截面改成六边形，下部主轴承座的主轴孔中心至底面的尺寸加大 200 mm，上半部的外侧板板厚改为 30 mm（加工前），见图 6.5-68。





(a) 16V240ZJB型机体(六边形)　(b) 16V240ZJA型机体(八边形)

图 6.5-68 柴油机机体外形

改进后的 16V240ZJB 型机体，强度和刚度都大为增加。经长期使用不仅不再出现变形和裂纹，还具有一定的强度储备。为进一步强化增压，提高柴油机功率和形成产品系列化奠定了基础。

6 电机机座焊接结构

电机机座主要起支撑定子、端盖和承受定子扭矩的作用。直流电机的机座还需作为导磁体。某些电机需要通冷却介质，因此机座要求耐压和防漏。定子铁心外径超过 1 m 的中型、大型同步电机、异步电机和直流电机，一般都用焊接结构。某些有特殊要求的小型电机，亦有采用。为满足不同电机机座的性能要求，采用焊接结构时需注意如下几点。

1）直流电机机座导磁部分的壁厚较大，径向对接焊缝应焊透并保证焊接质量，以保证电机性能。非导磁部分可按一般电机设计。

2）用水或氢冷却的电机机座，不仅要求一定的刚度，而且应能耐压和防漏。焊后应进行耐压和防漏试验。

3）防爆电机机座，为使外界冷却空气与电机内部结构隔开，宜于壳体内壁焊上波形薄板或圆管。

6.1 卧式电机机座的焊接结构

图 6.5-69 是这类电机机座的典型例子。机座内壁用纵向和横向肋加固。两端主板由 3 块 25 mm 的钢板用双 Y 形坡口（图 6.5-69VII 放大图）拼接而成。主板的突缘钻有 4 个吊装孔。接线盒焊于机座侧面（见 IV 放大图）。

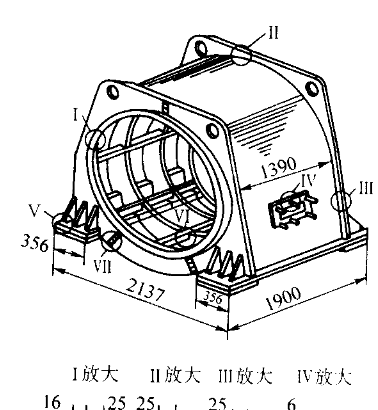


图 6.5-69 卧式电机机座

随着电机功率的增大，机座的直径或宽度也相应要增大，除适当加大机座钢板厚度外，还应增加机座中纵、横肋板的数目，以保证刚度。对于大直径重型卧式机座，为了便于制造和运输，可沿其轴线方向分为两瓣制造，然后再用螺栓连接成整体。

6.2 立式电机机座的焊接结构

大容量水轮发电机的机座为立式机座，它是一个全焊的环形结构。通常是由多层环板与立肋、支撑钢管和外壁等组焊而成。大型机组的电机机座各环板间常以宽大的盒形肋取



代立肋和外壁。图 6.5-70 为中、小型及大型机组电机机座截面的结构示意。

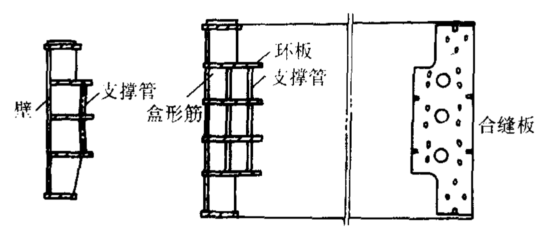


图 6.5-70 水轮发电机机座结构示意图

随着机组单机容量的增大，机座的直径也相应增大，如我国三峡机组的机座达 21.4 mm。当机座高度和直径过大时，为满足铁路运输要求，也常将下面一层取消，并将机座径向分成多瓣（可为 2 ~ 8 瓣）制造。各瓣之间的连接有两种形式，一种是用合缝板靠螺栓、销钉机械连接。其优点是：机座绝大部分工作量均可在工厂内完成（包括在其内焊定位肋、叠装冲片和嵌线圈等），电站安装省事，安装周期短。但是，也有很多缺点：合缝板、螺栓需耗用大量钢材和工时，并增加合缝板的配装、焊接工作量，甚至会损坏螺栓及在合缝面出现不允许的间隙（由焊接变形造成），而且在运行受热膨胀后，使铁芯松动；另一种是无合缝板，在电站把它们组焊成整体机座。其优点是：无需制造昂贵和费工的合缝板和螺栓，厂内制造进度快，机座的整体性好刚度大，不会在运行后因受热膨胀发生松动。其缺点是需将原在工厂内完成的工作量挪到电站进行，导致安装周期大为延长，且因电站条件所限，施工质量不如厂内好。

机座内圆在中间各层环板间，需装焊百余根连接定子冲片的已精加工的定位肋，这些肋和各层环板藉托板组焊在一起。为使各定位肋的内径与弦距在焊后不发生超差变形，要求托板与定位肋预先组焊，经矫直后再将托板焊于各层环板，见图 6.5-71。

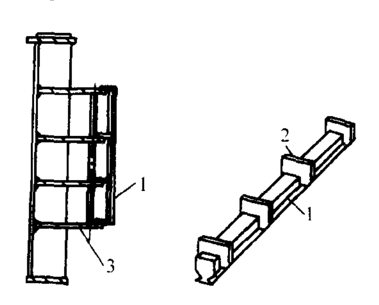


图 6.5-71 定位肋及其与机座的焊接

1—定位肋；2—托板；3—环板

图 6.5-72 为外径 14 m 的水轮发电机立式机座的实际结构。质量达 88 t，分成 4 瓣在工厂中制造，然后运到工地组焊成整体。图中的合缝板在组装时只起环板对接的对准定位作用（见 $C—C$ 视图），中间各层环板采用带垫板的单 V 形坡口接头焊接。

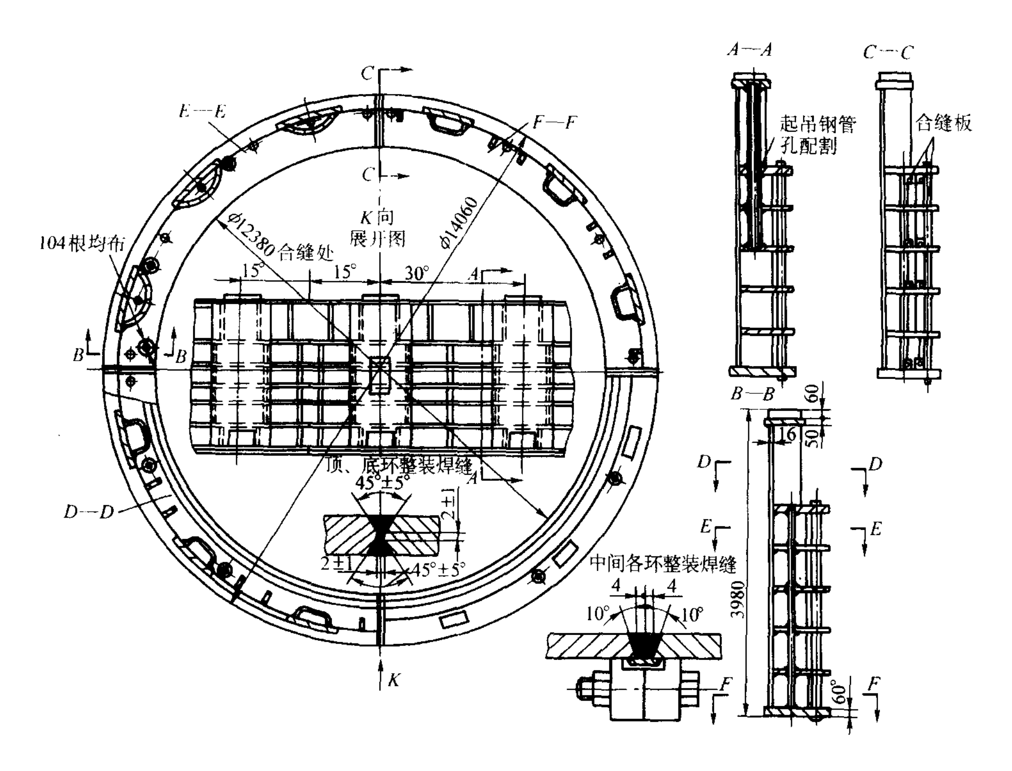


图 6.5-72 立式电机机座实例

编写：陈祝年（山东大学）



第6章　旋转体焊接结构

1　概述

在机器中绕某固定轴线旋转的运动件，通称为旋转体。旋转体中有些是绕自身的轴心线回转，有些则是绕体外某一轴线旋转。本章主要介绍绕自身轴心线回转的旋转体焊接结构，如轮子、转子、辊子、转轴和滚筒等典型的焊接结构。

大部分旋转体对结构设计的要求都是强度高、质量小、刚性大和尺寸紧凑。此外，还要求旋转过程中平稳，无振动或噪声等。过去多用铸造或锻造方法来制造，但只适用于中、小型的旋转体和批量生产的情况。大型或单件小批生产的旋转体，用焊接的方法制造更为优越，因为它比较容易实现上述的设计要求。

旋转体的设计，在选形上它必须是一个动、静平衡体，形状的轴对称是最基本的要求。设计时，务必使材料对回转轴线对称地分布，即尽可能使旋转体上产生离心惯性力系的合力通过质心，和对质心的合力矩为零。否则将产生不平衡的惯性力和力矩，就会对轴承和机架产生附加的动压力。从而降低轴承寿命，产生有害的振动或降低机器工作效率。

在强度上，旋转体必须能承受工作时的一切载荷。旋转体的类型很多，由于它们的用途、构造和工作条件等各不相同，因而受力的性质差别较大。必须针对具体情况作具体分析。

例如，普通圆柱直齿轮是最简单的旋转体，在传动过程中主要受到转矩、切向力、径向力和法向力。如果是圆柱斜齿轮，则还多一个轴向力。需根据这些力的大小、作用点和方向去分析与计算轮体整体的或体内某危险部位的强度和刚度。

又例如汽轮机的转子，由于它的结构特殊，工作条件复杂，在工作过程中承受着多种载荷，从而引起复杂的应力，如下。

1）传递功率而受到扭矩、引起切应力。

2）转子自重而产生弯矩，引起弯曲应力。对转动的转子来说，这是交变应力。

3）高速转动时，由于转子本身和叶片所造成的离心力，在转子内部产生切向和径向应力。

4）各级叶片前后压力差所造成的轴向应力。

5）由于不均匀温度场所造成的温度应力。

6）转子加工过程（如焊接或焊后热处理）所造成的残余应力。

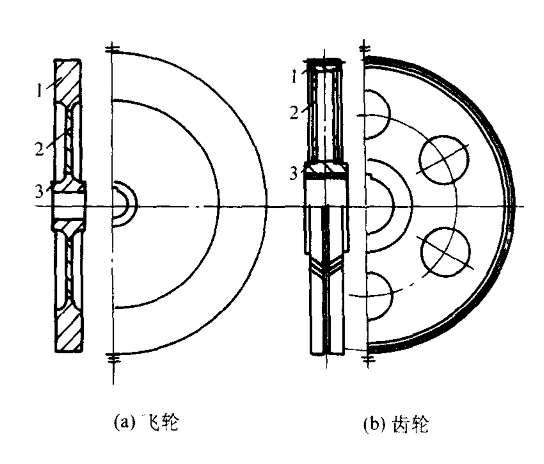
对受这样复杂应力的转子，就必须按最不利的受力情况确定出最危险截面上危险点的应力状态，然后用适当的强度理论进行强度计算。

旋转体运行过程中发生振动的问题，除上述因结构动、静不平衡引起外，还和旋转体的转速有关。每个旋转体都有一个能产生共振的转速，称临界转速。只要工作时旋转体的转速和该临界转速（包括临界转速成倍数关系的转速）错开，就可避免振动。一般认为，工作转速与临界转速错开15%～20%或更高一些，就能安全地工作。当工作转速低于某一阶临界转速0.5倍的旋转体，则视为刚性旋转体，设计时一般只需解决动、静平衡问题。例如，在短而粗轴上的齿轮或飞轮就属于这种情况；如果工作转速超过其一阶临界转速0.7的旋转体，则被视为柔性的旋转体，就必须进行临界转速的计算，以防止发生弯曲振动或扭转振动。例如，在长轴上的齿轮或飞轮就属于这种情况。

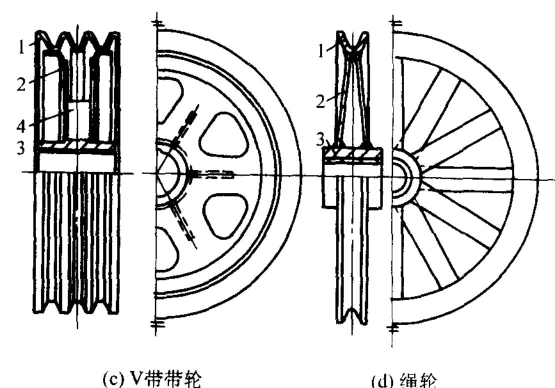
在刚度上，有些旋转体常因刚度不足而引起工作效率降低、振动甚至破坏事故。例如，齿轮或齿轮轴常因刚性不足而发生变形，就会改变齿轮的正常啮合，使传动效率降低和加快齿面或轴承的磨损；又如汽轮机的转子，它是产生动力的关键部件。它转速高，质量大。若因刚性不足而引起挠曲变形，就会改变动叶片和静叶片之间的轴向间隙，影响其能量转换的效率，甚至可能发生相互碰撞的严重事故。此外，还由于重心偏离了回转中心，工作时就会产生很大的不断改变方向的周期不平衡力而造成机器的强烈振动。所以，旋转体运行时整体和局部的变形都不能超过允许值。

2　轮式旋转体焊接结构

机器传动机构中的齿轮、飞轮、皮带轮等均属轮式旋转体。大型轮式旋转体多采用焊接方法来制造，图6.6-1示出几种典型的轮式旋转体焊接结构。



(a) 飞轮　　(b) 齿轮



(c) V带带轮　　(d) 绳轮

图6.6-1　典型的轮式旋转体焊接结构

1—轮缘；2—轮辐；3—轮毂；4—加强肋

从图中可把轮式旋转体划分为工作部分和轮体部分，前者指直接与外界接触并实现轮的功能部分，如齿轮的轮齿，叶轮的叶片等；后者指对工作部分起支承和传递动力作用的基体，它是由轮缘、轮辐和轮毂等三个基本构件组成。为了提高轮体的刚性有时在这三者之间用肋进行加强。设计轮式旋转体焊接结构的工作主要是确定组成轮体各构件的构造形式以及它们之间的连接关系。

2.1　轮缘

轮缘位于基体外缘，与工作部分相连，起支承与夹持工



作部分的作用。

有些焊接齿轮的轮齿是直接从轮缘上作出，这样的轮缘结构最简单。但是，轮缘的材料必须同时能满足轮齿工作性能要求和它与轮辐焊接性要求，此外还要注意材料的轧制方向。

环状轮缘的截面形状由轮子的功能及受力性质决定。其毛坯的制备方法取决于它的直径、环截面形状和尺寸以及制造设备能力。表 6.6-1 列出常用的几种制备方法。

表 6.6-1　轮缘毛坯的制备方法

制备方法	示意图	适用范围
整锻或整铸	厚 宽	1）轮缘直径小，厚度大和宽度小的情况 2）需具有相应的铸造或锻造设备能力
分段锻造然后拼焊		轮缘厚度较大，而锻造设备能力不足时
分块气割下料后拼焊		轮缘直径大，宽度小而厚度大的情况
钢板卷成圆筒，焊后逐个切成		具有大型卷板设备和批量生产的情况
用专轧型材，卷圆后对焊成单个轮缘		轮缘截面形状较复杂，其宽度大而厚度小的情况，生产批量大

轮缘的焊接方法可根据环截面形状和尺寸从电弧焊、电渣焊、闪光焊或电子束焊中选择。当用电弧焊焊接较厚的轮缘时，在接头处需预制坡口才能保证焊透。对更大厚度的轮缘，宜采用窄间隙焊接技术，以减少填充金属量。当用电渣焊时，焊后需正火处理，以改善接头的组织与性能。

对辐条式轮体的轮缘，其对接焊缝的位置宜布置在工作应力最小的位置上，见图 6.6-2a。

焊接齿轮的齿圈和轮缘可以是整体式的，即轮齿直接从轮缘上切削出来。也可以是装配式的，在齿圈和轮缘之间靠压配合连接起来，见图 6.6-3。整体式的结构简单，制造容易，但轮缘材料除必须同时满足轮齿的强度和齿面硬度的要求外，还要满足它与轮辐之间的焊接性要求；装配式的结构，其轮缘只起支承齿圈的作用，可以选择廉价的普通碳素结构钢，如 Q235A 钢等。而齿圈可选择强度高，耐磨性好的材料，磨损后还可以拆换。齿圈（或带齿的轮缘）上的对接焊缝位置应在两轮齿之间，待削去部分不必焊透，见图 6.6-2b。此外，制备齿圈的毛坯时，要注意钢材的轧制方向（即层状特征），见图 6.6-4。

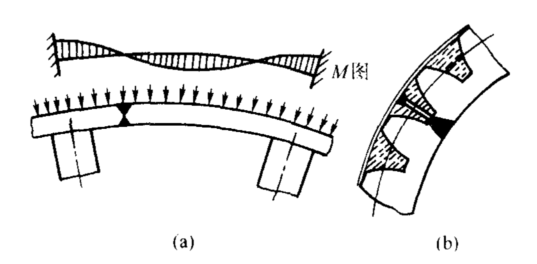


图 6.6-2　轮缘上对接焊缝的布置

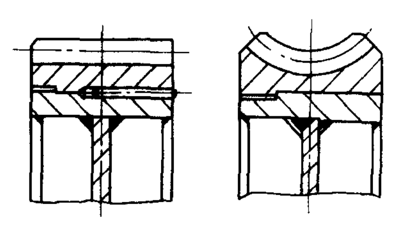


图 6.6-3　齿圈和轮缘的压配合连接

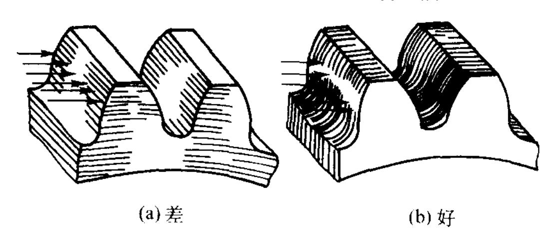


图 6.6-4　轮齿层状组织与受力方向

焊接飞轮的轮缘可用钢板组合的结构去取代厚大的锻件，见图 6.6-5a。当需要很宽的轮缘时，可采取若干个飞轮并联的结构，见图 6.6-5b。

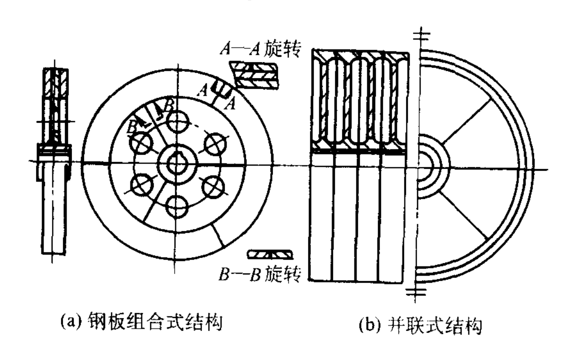


图 6.6-5　飞轮的焊接结构

2.2　轮辐

主要起支承轮缘和传递轮缘与轮毂之间扭矩的作用。此外，还承受因离心力而产生的径向力和因轴向推力而引起的侧弯。

可以设计成板状或条状（即支臂状）两种轮辐结构。板式的轮辐是按带中心孔圆板计算其强度和刚度；条式的轮辐的计算较为复杂，要把整个轮体看成超静定杆件系统来计算，按载荷求出辐条的内力才能确定其截面形状和尺寸。

轮辐的材料，多使用焊接性能好的 Q235 钢或 16Mn 钢等。

2.2.1　板式轮辐

（1）单辐板式轮辐

适用于轮缘较窄且受力小的旋转体，如焊接齿轮的轮缘宽度小于分度圆直径的 15% ~ 20% 时采用。直径大的辐板可



用钢板拼接，其拼接焊缝的位置和轮缘的对接焊缝的位置尽可能错开，见图6.6-5a。为了减轻质量或便于制造，可在辐板上开孔，图6.6-6为常用的几种开孔形式。开孔的数量，按旋转体直径大小确定，表6.6-2给出焊接圆柱齿轮辐板内开圆孔数量的参考值。孔的位置约在轮缘内径至轮毂外径中间沿圆周均布。孔径约为齿顶圆直径的10%～20%之间。

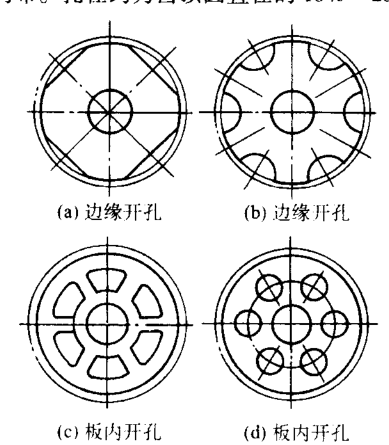


图6.6-6　辐板上开孔的形式

表6.6-2　焊接圆柱齿轮辐板开孔数量

齿顶圆直径/mm	开圆孔数/个
<300	不开孔①
>300～500	4
>500～1 500	5
>1 500～3 000	6
>3 000	8

①　吊运靠轴孔或附设螺钉孔

为了改善受力情况和提高轴向刚度，可在辐板两侧焊肋板，肋板的截面见图6.6-7。图6.6-7a为平板肋，适应性强，应用广泛；图6.6-7b的刚性大，空气阻力较小，载荷较大时适用；图6.6-7c是直接在辐板上冲压出的凸肋，减少了焊缝，适用于批量大的轻型旋转体中。

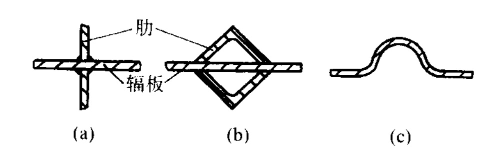


图6.6-7　辐板上加肋板的截面形状

连接肋板的角焊缝，可以是连续的或断续的。转速高、载荷大以及有腐蚀情况的旋转体宜用连续焊缝。其焊脚尺寸K按肋板厚度δ确定，通常$K=(0.5\sim0.7)\delta$，δ按辐板厚度的0.6选取。

带肋板的结构，制造工艺较复杂，成本高、生产率低。因此，有时适当增加轮缘和辐板的厚度或改用双辐板结构，也不用带肋板的单辐板结构。

(2) 多辐板式轮辐

适用于轮缘宽度大而且同时受到较大轴向力和径向力的情况。当焊接齿轮轮缘的宽度大于分度圆直径的10%～20%时，采用双辐板；当轮缘宽度大于1 000～1 500 mm时，采用三辐板。

各辐板的配置可参照图6.6-8确定。若辐板与轮缘和轮毂的连接采用双面角焊缝，应在辐板上开孔，使内部焊缝能施焊。

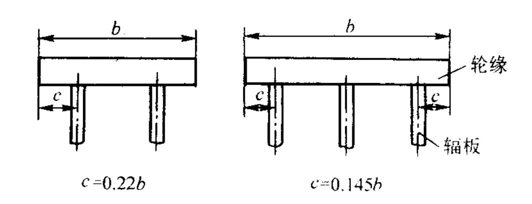


图6.6-8　辐板的相互位置

为了提高辐板的刚度和稳定性，可在两辐板之间设置肋板。肋板数与开孔数相同，位于两孔之间。因肋板施焊困难，且不利于机械化和自动化生产，现已逐渐用圆管代替内部加肋板的结构，见图6.6-9。图中在辐板上钻一小透气孔E，直径约5 mm，在消除应力退火后再用焊补或螺钉封堵。

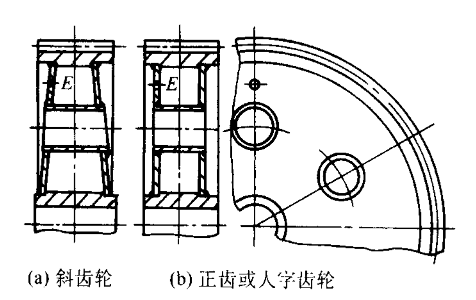


图6.6-9　用圆管加强两辐板的刚度

2.2.2　条式轮辐

为了减少质量和节省金属，在大直径的旋转体中常用条式的轮辐，见图6.6-1d和图6.6-10。

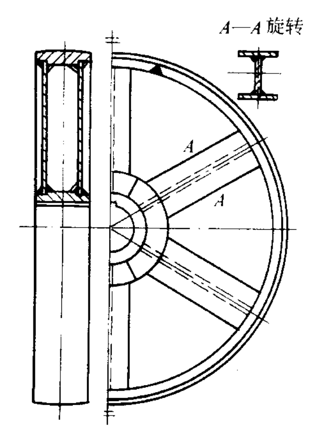


图6.6-10　辐条式的焊接带轮

辐条的断面形状和尺寸按受力性质和刚度要求确定。为减少焊接工作量，应优先选用型材（如扁钢、角钢或工字钢等）作辐条。大型旋转体可用钢板焊成工字形或箱形的结构。

辐条数目越多，对轮缘的支承条件越好，但焊接工艺却随着辐条数目的增加而变得复杂，故不宜过多。适当增加轮缘和辐条的断面积或断面模量，可以减少辐条的数量。

2.3　轮毂

为了能通过键把轮体装到转轴上和为轮辐提供充分的刚性支承，轮毂要具有足够的厚度，一般外径可取轴径的1.2～1.6倍；为了防止轮体在轴上发生摆动，其长度一般取轴径的1.2～1.5倍。



单辐板式的旋转体，其轮毂长度较短，可以设计成图 6.6-11 的结构。多辐板式旋转体的轮毂，其长度较大，可分段制造，然后并联使用，见图 6.6-5b 和图 6.6-28b。如果与轴无拆换要求时，可设计成无毂的焊接旋转体结构，见图 6.6-12。

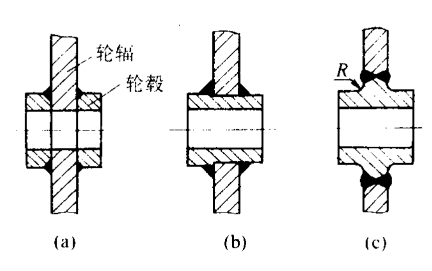


图 6.6-11 单辐板式旋转体轮毂的结构形式

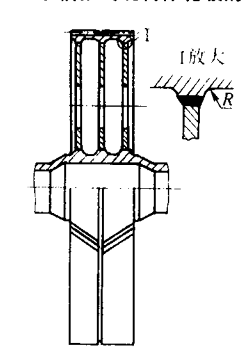


图 6.6-12 三辐板式无毂焊接齿轮

轮毂的毛坯最好用锻件，其次是铸件。前者多用 35 钢制造，后者常取 ZG275－485H 钢。

2.4 轮缘、轮辐和轮毂的连接

轮缘、轮辐和轮毂之间可用 T 形接头或对接接头连接，其焊缝均为承载焊缝，其中以轮辐和轮毂之间的连接焊缝受力最大。图 6.6-11 为两者连接的基本结构形式。

图 6.6-11a 的辐板直接把部分扭矩经键传递到轴上，减轻了两环状角焊缝受力，因而可以用较小的焊缝尺寸。

图 6.6-11c 是适用于转速高或经常逆转与受到冲击载荷的旋转体。需在轮毂的外缘（或轮缘的内侧）待焊部位预先加工凸台，使之与轮辐对接。这样焊缝避开了结构断面突变部位（应力集中区），易于施焊和焊缝探伤。凸台不宜过高，否则增加制造成本，但应保证施焊方便且热影响区不落在拐角处。凸台两侧与基体相连处应有较大的圆角过渡，焊缝表面与母材表面最好平齐。

图 6.6-11b 和图 6.6-13a 均是 T 形接头，其区别是前者有便于装配的止口。两者角焊缝的尺寸均较大，填充金属量多，而且径向力与未焊透面垂直，疲劳强度低。图 6.6-13b 为焊透的 T 形接头，有较高的疲劳强度，但焊接工艺较复杂，成本高。图 6.6-13c 是较好的设计，轮毂（或轮缘）上加工止口，利于装配定位；辐板上作出单边 V 形坡口，保证垂直径向力的面焊透，平行径向力的止口面焊透与否对疲劳强度影响很小。

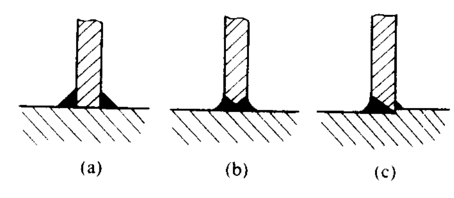


图 6.6-13 轮缘、轮毂与轮辐的连接接头

对于双辐板的旋转体，内部施焊条件差，需减少两辐板之间的焊接工作量。推荐采用图 6.6-14 的接头形式。图 6.6-14c 采用单面焊背面成形焊接工艺。

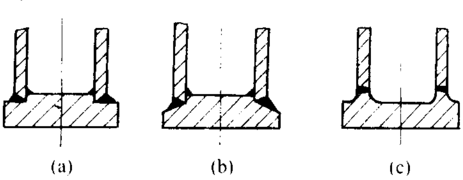


图 6.6-14 双辐板与轮毂或轮缘的连接结构

在辐板式的轮体上，连接轮缘、轮辐和轮毂上的环形焊缝是处在刚性拘束下焊接的，易在焊缝或近缝区的母材上产生裂纹。除在工艺上采取如预热、调整施焊程序等措施外，在结构设计上应注意如下几点。

1）避免用铸钢件或有层状夹杂的钢材作轮缘或轮毂的毛坯。

2）当轮缘或轮毂是中碳钢或焊接性较差的合金钢时，可在接头处堆焊厚度约为 6 mm 的抗裂性能好的过渡金属层。

3）在保证焊缝质量的前提下，装配间隙和坡口角度不宜过大。

4）把 T 形接头改为对接接头。

5）在不影响整体刚度的前提下，在辐板上适当开孔，以减少局部拘束度。

2.5 轮式旋转体焊接结构设计实例

（1）单辐板式圆柱人字齿轮（图 6.6-15）

该齿轮用于机械压力机上，法向模数 $m_n = 12$ mm，压力角 $\alpha = 20°$，螺旋角 $\beta = 30°$。材料：轮缘（齿圈）为 45 钢，轮毂为 35 钢，辐板为 Q235A。用 CO_2 气体保护焊，H08Mn2SiA 焊丝。焊后经（625 ± 25）℃消除应力热处理。切齿后，齿面中频淬火，45～50 HRC。

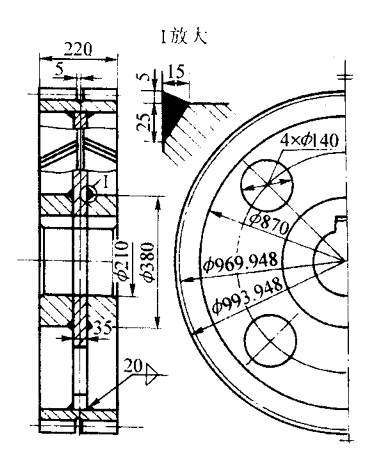


图 6.6-15 单辐板式圆柱人字齿轮

该齿轮的特点是轮毂为组合式的，两面用小坡口的焊缝连接；轮辐和轮缘连接不要求焊透，用双面角焊缝。

（2）双辐板式圆柱斜齿轮（图 6.6-16）

该齿轮法向模数 $m_n = 8$ mm，端面模断 m_s = 8.074 76 mm，压力角 $\alpha = 20°$，螺旋角 $\beta = 7°48'10''$。材料：轮缘（齿圈）为 40CrMo4V 钢，轮毂为 45 钢，轮辐和管子为 Q235A。用 CO_2 气体保护焊，H08Mn2Si 焊丝。

该齿轮的结构特点是：斜齿轮有轴向力，采用双辐板式结构；由三节直径 60 mm 管子均布地连接两辐板，以提高其刚度和稳定性；轮缘、轮辐和轮毂之间的连接焊缝均为单边 V 形坡口焊缝，内侧不焊；所有焊缝规则且连续，易于机械化和自动化生产。

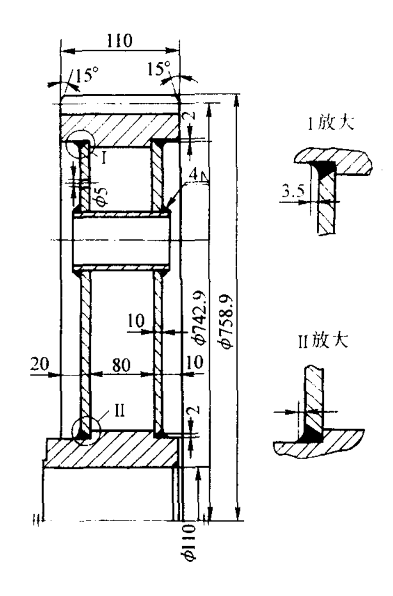


图 6.6-16 双辐板式焊接圆柱斜齿轮

(3) 双辐板式绳轮（图 6.6-17）

该绳轮用于重型挖掘机上。轮缘和轮毂均用 35 钢制造，轮辐和肋板为 Q235A 钢。由于减轻孔较大，其工作特点和辐条式的没差别，内外焊缝施焊方便。

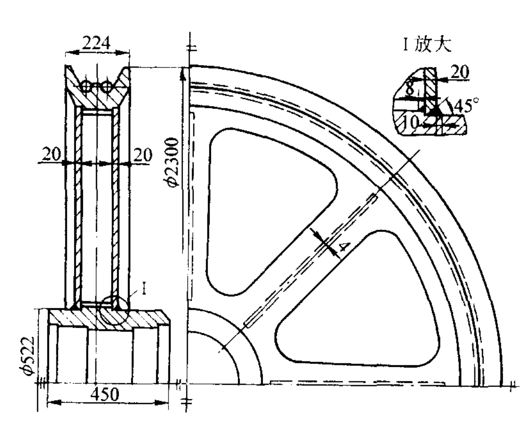


图 6.6-17 双辐板式焊接绳轮

3 筒式旋转体焊接结构

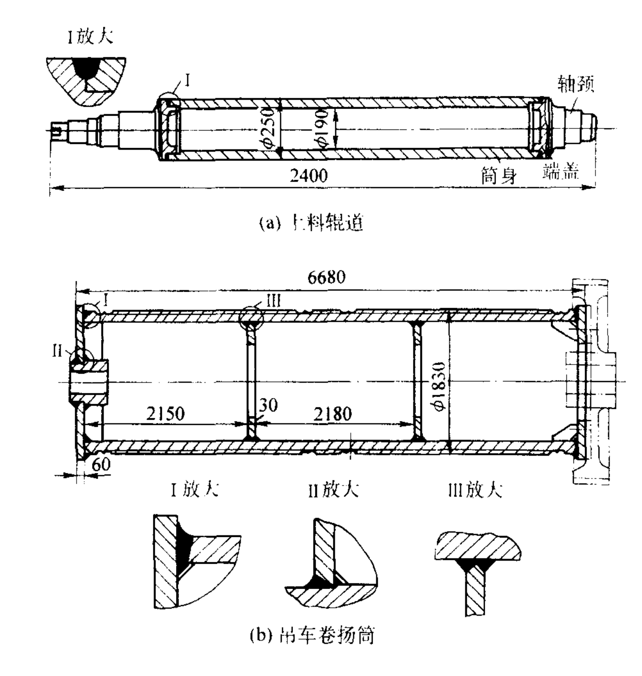
筒式旋转体主要由筒身、端盖和轴颈等构件焊成，图 6.6-18 是这类旋转体的焊接结构。它们之间因用途和受力性质不同，在局部构造上有差别。

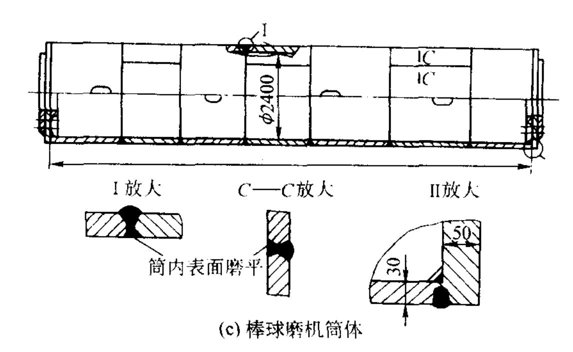
3.1 筒身

长的筒身由若干筒节接成，大直径筒节由钢板卷圆后用纵向焊缝连接。筒节之间的连接均应采用对接接头。遇到壁厚不同的筒节对接时，应将较厚筒节的接边削薄，见图 6.6-18d。相邻两筒节的纵向焊缝宜相互错开。

为了防止筒身局部失稳，保持其圆度，可在筒壁外侧或内侧焊上刚性圈，见图 6.6-18b。刚性圈的截面形状见图 6.6-19。它与筒壁连接可用断续角焊缝，其总长不小于筒身周长的一半。在腐蚀介质中工作或受冲击载荷的筒身应用连续角焊缝，并用最小的焊脚尺寸。

在筒身上开人孔处需补强时，应重视孔形和补强板的设计。图 6.6-20a 的结构在交变载荷作用下很快产生疲劳裂纹。如果设计成图 6.6-20b 的结构，即方孔周边磨去棱角，拐角作成圆角；补强板边缘也磨去棱角，并作成圆弧状；周围角焊缝表面向母材表面平滑过渡，则可提高其疲劳强度。





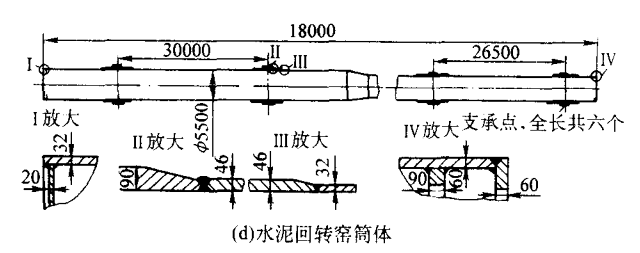


图 6.6-18 几种筒式旋转体的焊接结构

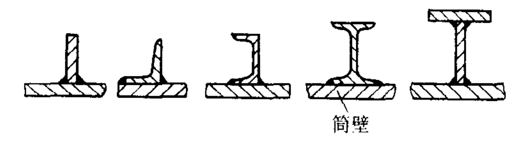


图 6.6-19 刚性圈的截面形状

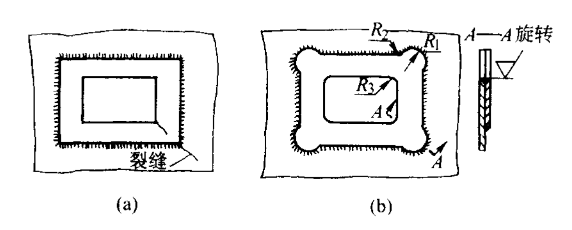


图 6.6-20 筒身上人孔和补强板的结构



3.2　端盖

端盖又称封头。小直径的端盖常和轴颈一起铸造或锻造而成，见图 6.6-18a；大直径端盖宜用钢板冲压或拼焊成。压型的端盖可设计成椭球形或碟形的曲面结构，不但强度和刚度好，而且可以实现与筒身对接。平端盖的备料简单，但和筒身的连接是角接，焊缝处在应力复杂区，在动载荷下不利。图 6.6-21 为球磨机端盖的两种结构，其端盖中心是进料口，作了补强。

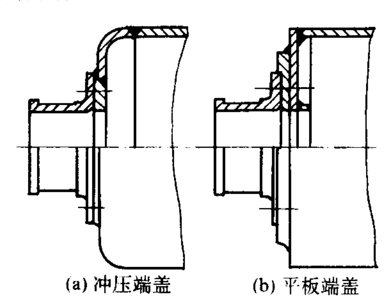


图 6.6-21　球磨机端盖的焊接结构

3.3　筒身、端盖和轴颈的连接

轴颈与端盖、端盖与筒身之间的连接方式，当有拆卸要求时，需设计法兰用螺栓连接，其余采用焊接连接，见图 6.6-21。平端盖与筒身连接用角接头，其疲劳强度较低。为提高其疲劳强度，可改成对接接头，见图 6.6-22。

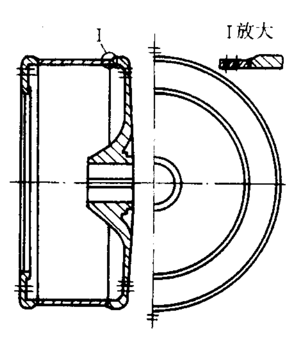


图 6.6-22　离心机转鼓的焊接结构

端盖位于小直径的轴颈与大直径的筒身之间，受力复杂，其强度和刚度必须保证。图 6.6-23 提供几种可以加强端部的焊接结构形式。图 6.6-23a、b 呈放射状设置肋板，图 6.6-23b 的外形平整美观，只能用于直径较大，筒内能施焊的情况；图 6.6-23c 是采用双层端盖的结构，刚性好，传递转矩能力强，且焊接工艺较简单，图 6.6-24 为应用实例。

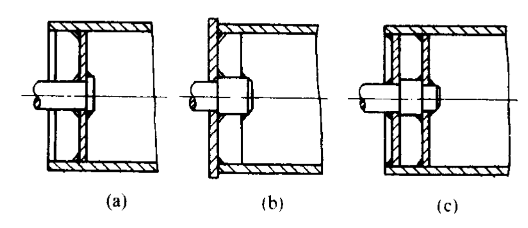


图 6.6-23　轴颈、端盖和筒身之间的加强结构

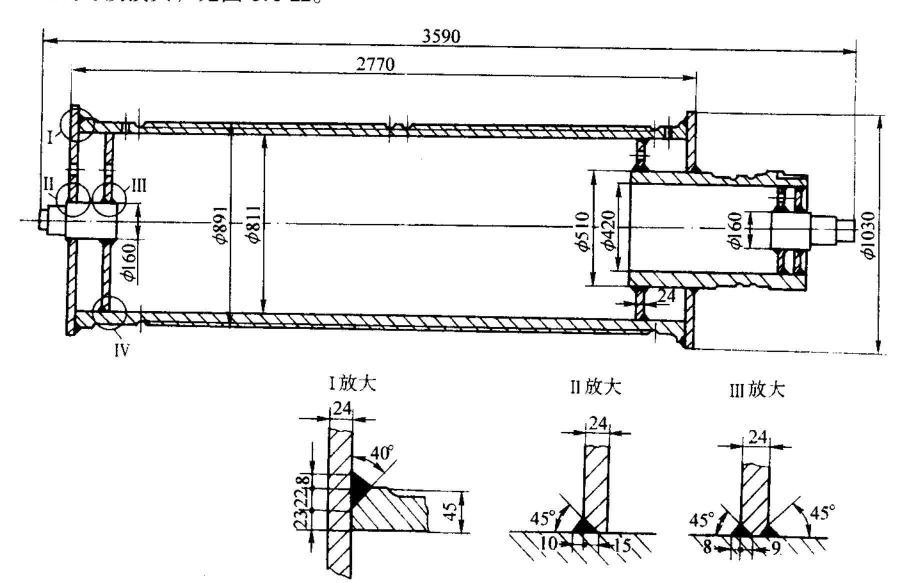


图 6.6-24　70/20 t 起重机卷扬筒的焊接结构

4　转子焊接结构

4.1　汽轮机、燃气轮机转子的焊接结构

汽轮机和燃气轮机的转子起工质能量转换和功率传递的作用，它由主轴、叶轮和叶片等组成。现代转子可用整锻、套装和焊接方法制造。与其他两种方法相比，焊接的转子具有刚性好、起动惯性小、临界转速高、锻件尺寸小、质量易保证等优点，因而大型汽轮机的低压转子、燃气轮机的透平转子和压气机转子已广泛采用。随着核电的发展，湿蒸汽汽轮机的转子更趋向于采用焊接的结构。

图 6.6-25 是国产 300 MW 汽轮机低压焊接转子。

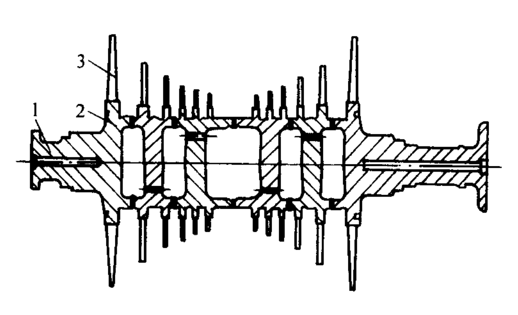


图 6.6-25　300 MW 汽轮机低压焊接转子
1—主轴；2—叶轮；3—叶片

焊接的转子一般采用盘鼓式的结构，即由两个轴头、若干个轮盘和转鼓拼焊而成的锻－焊结构。转子处在高温高压的气体介质中工作，转速很高，要求高度可靠。因此，对材料及焊接质量要求十分严格，焊后还要有可靠的焊接质量检测措施。正确的焊接接头设计和合理的焊接工艺相配合是制造好焊接转子的关键。在设计焊接接头时，要解决好下列技术问题。

1）转子上每条厚的环形对接焊缝，只能采用单面焊接。如果采用电弧焊，则需保证第一道焊缝能充分焊透并获得很好的反面成形，而又不致引起裂纹。在随后各层焊接过程中，也不出现裂纹、夹渣和未焊透等缺陷。

2）保证轴和轮盘装配和焊后具有精确的同心度。

3）具有可靠的焊缝质量检测条件。

图6.6-26列出目前国内外使用的几种转子对接接头的结构形式。图6.6-26a是气体保护焊和埋弧自动焊并用的接头。在焊缝根部设计成锁边接头，左右两凸缘共厚5 mm，它们之间约有0.1 mm的过盈配合，满足装配定位要求。先用TIG焊或等离子弧焊焊接第一道焊缝，要求单面焊背面成形。然后用MIG焊至一定厚度再转用埋弧自动焊填满整个坡口。在焊缝根部两侧，设计45°斜面的槽，为超声波探测焊缝根部质量所需的反射面。图6.6-26b、c、d接头形式的设计意图基本相似，但各有特色。图6.6-26e是窄间隙焊接用的接头，其填充金属量很少。

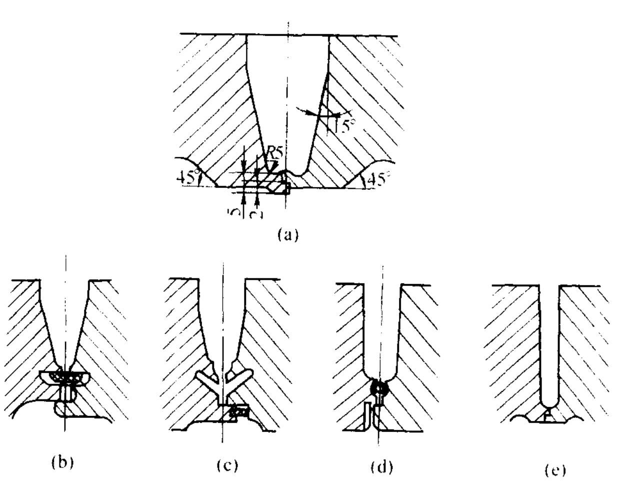


图6.6-26　焊接转子焊接接头的结构形式

4.2　电机转子的焊接结构

大型电机转子的支架宜用焊接结构。设计时要考虑它与叠片铁心（磁轭或磁极）和传动轴的连接方式。

当用轮缘支承磁极时（如一般同步电机的转子），可采用与轮式旋转体相同的焊接结构（图6.6-27），设计方法参见本章1节。但需注意，对双辐板式的轮辐要适当开孔，既便于施焊和安装磁极，又有利于通风。

当用纵向肋支承叠片铁心时（如直流电机和异步电机转子等），可用图6.6-28的焊接结构。图6.6-28a、b的辐板是垂直转子轴线的结构，纵向肋嵌置在辐板外缘的槽内，这样便于装配定位，还能减轻连接角焊缝的受力。对于经常有冲击、逆转或急刹车的电机，辐板与轮毂的连接宜用焊透的对接接头［图6.6-28b］。该转子的轮毂较长，为了便于内孔加工和易于热套到轴上，把轮毂分成三段再并联焊接起来。对于小直径而又无拆卸要求的电机转子支架，可省去轮缘，直接把辐板或纵向肋焊到轴上［图6.6-28c］。设计这种结构要注意减少应力集中，以提高疲劳强度。这里是把T形接头变成对接接头；纵向肋的两端向轴平缓过渡；在应力集中较严重处设应力缓和槽。

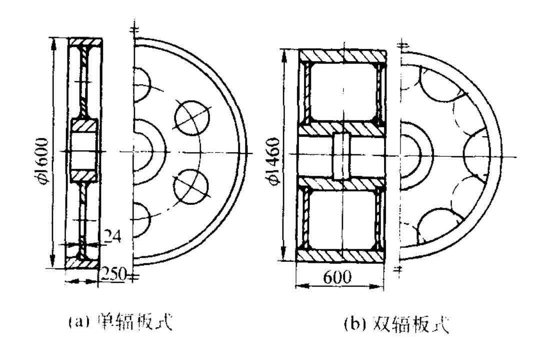
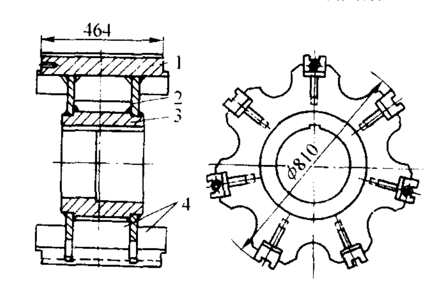
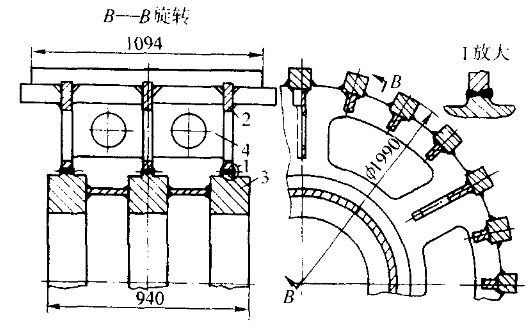


图6.6-27　普通同步电机转子焊接支架





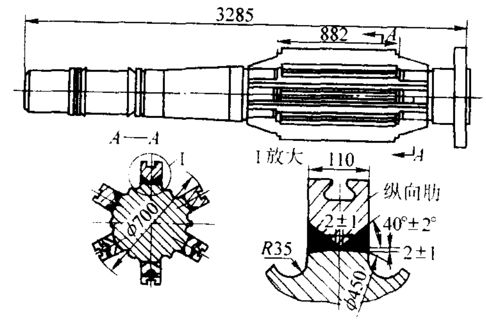


图6.6-28　具有纵向肋的电机转子焊接支架

1—纵向肋；2—轮箍；3—轮毂；4—加强肋

对于大型卧式电机的转子，在不影响强度和刚度的情况下，可设计成无毂空心的焊接结构（图6.6-29）。它质量小，起动惯性小，节省金属和简化制造工艺。

大型立式电机转子焊接支架一般设计成辐条（支臂）式的结构。图6.6-30是一种水轮发电机是形转子支架的焊接结构。运转时，支臂除承受转矩外，还受轴向载荷，故常设计成工字或箱形结构。该图的支臂为箱形断面，较之工字形断面具有更大的抗弯和抗扭刚度。考虑到运输和加工方便，支臂与中心体采用螺栓联接。

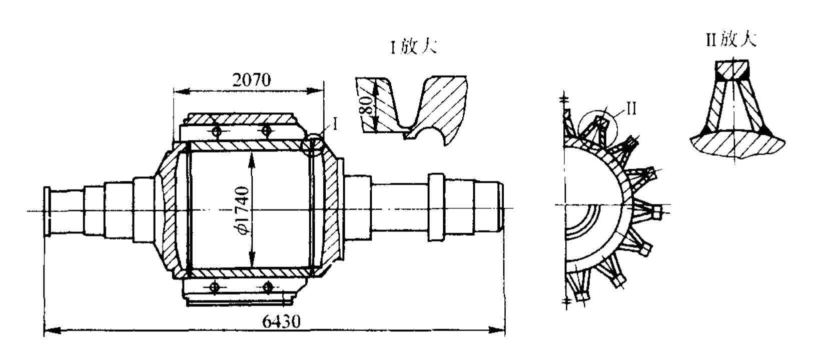


图 6.6-29 大型无毂空心电机转子焊接支架

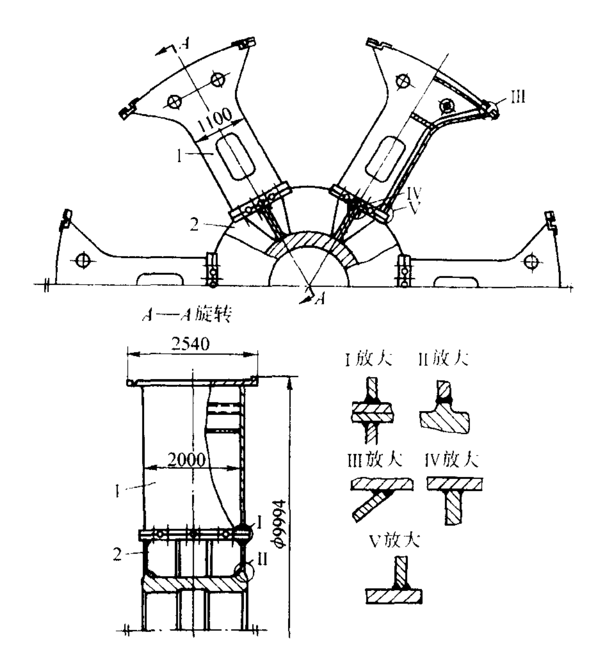


图 6.6-30 大型立式水轮发电机转子焊接支架
1—箱形支臂；2—中心体

5 水轮机转轮的焊接结构

水电机械中混流式水轮机的转轮是由上冠、下环和10多个叶片组成的旋转体。大中型的转轮受工厂铸造能力和运输条件限制，常设计成铸－焊联合结构。

5.1 整体式焊接转轮

整体式焊接转轮的基本特点是用焊接方法把上冠、叶片和下环连接成整体。它们之间的连接有下列三种设计方案：

1）预先在上冠和下环上开槽，然后把叶片镶入槽口里，再施焊。

2）在上冠和下环焊接部位铸出一凸台，叶片与凸台对接焊。

3）采用T形接头，叶片直接焊在上冠和下环的过流表面上。

前两个方案虽便于焊接，但铸造和机械加工的困难较大。当前多用第三种方案，见图6.6-31。该结构焊接的主要问题是：结构刚性大，焊时易裂；叶片数目多，形状复杂，施焊空间窄；T形接头的角焊缝具有空间变断面，施焊和质量检测困难。焊接方法需根据转轮的直径大小和工厂的变位条件选择，目前有焊条电弧焊、MAG焊和熔化嘴电渣焊三种。MAG焊的效率高于焊条电弧焊，但全位置焊接不如焊条电弧焊适应性强，两者均适于焊接中型转轮。图6.6-31b给出焊条电弧焊用的接头形式。大型转轮（直径大于6 m）最好采用熔嘴电渣焊，其效率最高。其缺点是操作较复杂，需有变位机械和翻转装置配合，且使每条焊缝接近垂直位置下焊接，有时焊后需正火处理。图6.6-31c给出电渣焊的接头形式。

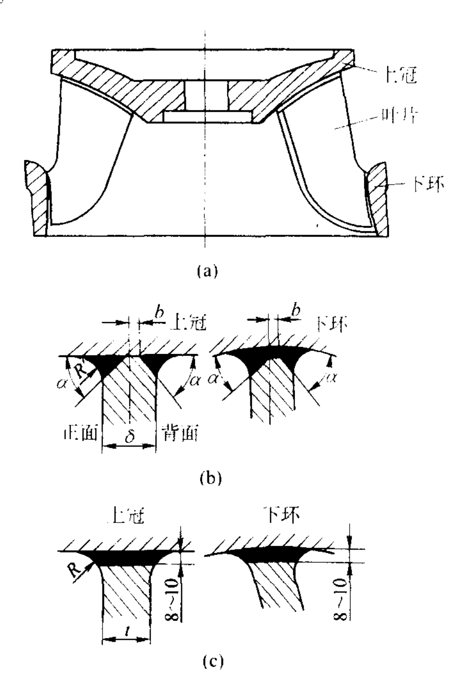


图 6.6-31 整体式焊接转轮及其接头设计

$\left(b=0\sim3\text{ mm};\ R=\left(\frac{1}{3}\sim\frac{1}{2}\right)\delta;\ \alpha=45^\circ\right)$

转轮在水下运行过程中，将有汽蚀和泥砂磨损发生。为此，除要求叶片线型精确外，还需从材料上解决。对整体式焊接转轮有三种做法：一是全部采用不锈钢制造。这样焊接工作量最少，工艺简单，但耗用大量贵重金属；二是用碳素钢（如20MnSi）制好整个转轮后在汽蚀和磨损面作不锈钢堆焊，堆焊层经修磨后厚度不小于5 mm。这种方法可以节省贵重金属，但在大面积的不规则表面上堆焊，工艺复杂，焊接变形较难控制，而且生产周期长；三是采用异种钢的焊接转轮，即在汽蚀和泥砂磨损部位（主要在下部）用马氏体不锈钢（如0Cr13Ni4Mo）等，上部用碳素钢，两者焊成整体，图6.6-32示出三种结构设计方案。其中图6.6-32c方案比较经济合理，不锈钢用量介乎图6.6-32a、b之间，只有中部一条焊缝属异种钢焊接。

因受铁路运输限制，在工厂中制造的整体式转轮的直径应在5.5 m以下，大于此直径，需通过水运或在工地附近制造。



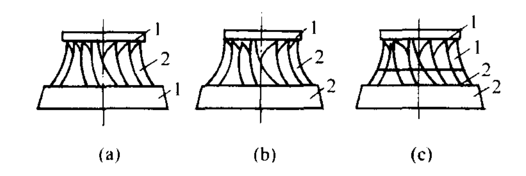


图 6.6-32 三种异种钢焊接转轮的设计方案

1—碳素钢；2—马氏体不锈钢

5.2 分瓣式焊接转轮

分瓣式焊接转轮是根据运输条件及制造方便，把整个转轮分成若干瓣，在工厂中分别制造好后运到工地进行组装成整体。分瓣及其连接的结构甚多，图 6.6-33 是较为常用的一种。它分成两瓣，在工厂中制造。在工地上，上冠用螺钉连接（把合），下环用焊接连接。

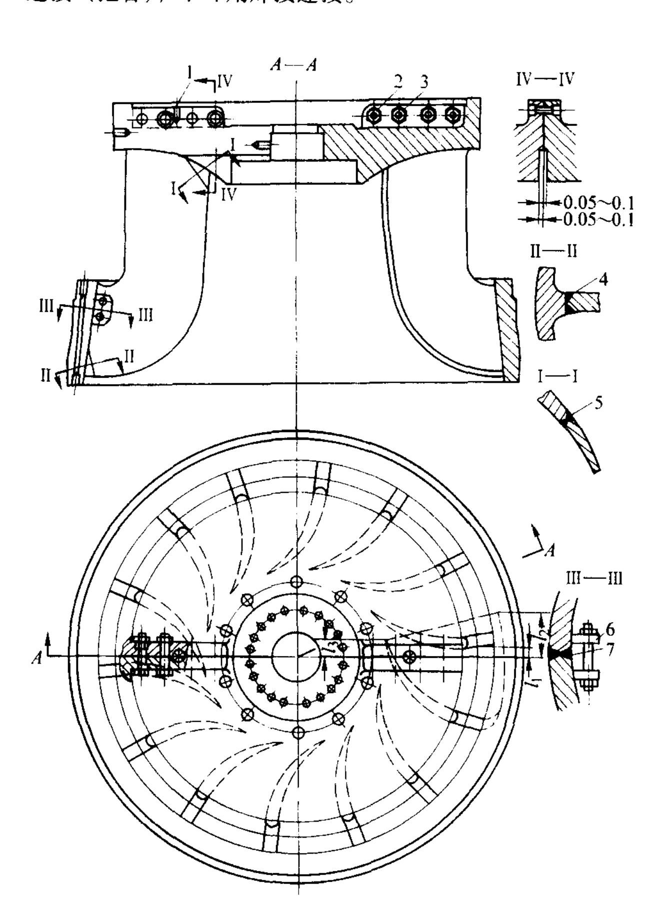


图 6.6-33 分瓣式焊接转轮

1—定位销；2—把合定位螺钉；3—把合螺钉；4—下部分割面；5—上部分割面；6—临时组合法兰；7—下环分割面

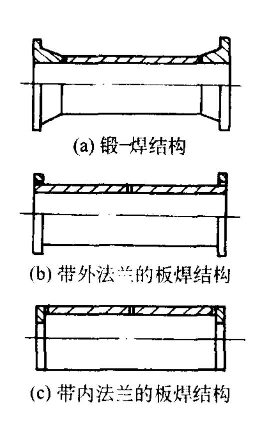
6 其他旋转体焊接结构

6.1 转轴的焊接结构

转轴是支承带毂零件并使之一起旋转以传递运动和扭矩的机械零件，工作时除承受扭矩外，有时还受到弯矩和轴向力。

焊接轴的设计与锻造或铸造轴的设计，在强度、刚度、表面形状和内在质量等方面的要求是相同的。但是设计焊接轴时，必须充分利用焊接能以小拼大、能进行异种金属焊接、能方便地制造空心断面结构的优点。同时要注意，轴的材料一般都要求有较高的强度或耐磨性，而能满足这些要求的金属材料其焊接性能都较差。因此，在做好结构设计的同时，还要有很好的焊接工艺措施相配合。

大型水轮发电机组中的主轴，直径一般都大于 1 m，长度在 3 m 左右，两端有法兰。为了减少质量，设计成空心轴，这样的轴整体锻造很困难，用焊接方法制造要简易得多。图 6.6-34 示出三种焊接的结构。图 6.6-34a 轴筒和法兰均为锻件，焊缝少，但需有大型锻造设备，加工余量大，成本高；图 6.6-34b 是带有外法兰的板焊结构，轴筒由厚钢板卷圆用纵向焊缝连接。法兰也用钢板制备，加工量小，它与筒体需用窄间隙 CO_2 焊。整轴制造周期短而成本较低，但必须有大吨位卷板机，焊后还必须矫圆，焊接难度大，工作量较多。图 6.6-34c 的结构与图 6.6-34b 区别在法兰上，但材料利用率较外法兰为高，成本较低。



(a) 锻-焊结构

(b) 带外法兰的板焊结构

(c) 带内法兰的板焊结构

图 6.6-34 水轮机主轴的焊接结构

图 6.6-35 是万向接头轴的两种焊接结构。一种是用电弧焊接的（见图 6.6-35a），它适于单件小批生产；另一种是用摩擦焊的（见图 6.6-35b），适于大批量生产。这样的转轴，如果采用整体锻造，则中部只能是实心的，而且叉头和花轴（或空心轴套）的机械加工复杂，生产周期长，成本高。改用焊接方法制造，叉头和轴套在焊接前单独加工，既方便又易保证加工质量。

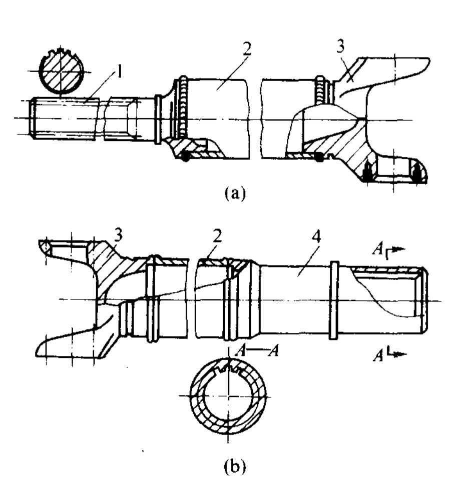


图 6.6-35 万向接头轴的焊接结构

1—实心花轴；2—套筒；3—叉头；4—空心花轴

6.2 风机叶轮的焊接结构

压缩机和鼓风机的叶轮一般是由轮盖、叶片和轮盘组成。叶轮转速高，离心力大，强度要求高，动平衡要求严。因此，对选材和焊接有严格要求。

叶片与轮盘和轮盖的连接要求采用焊透的 T 形接头，两面的角焊缝与母材交界处（焊趾）应圆滑过渡（见图 6.6-36a）。当轮盘和轮盖之间的空间过于狭窄或叶形复杂，施焊困难时，可用（见图 6.6-36b）的结构，即在轮盘和轮盖上按叶片形状和所在位置开通槽，叶片镶入通槽内，然后从外面施焊。这种方法焊接方便，焊缝不受力，但开通槽的机械加工量大，精度要求高。为此，可以只在轮盖上开通槽，叶片和轮盘仍用 T 形接头先行焊接，然后再镶入轮盖的通槽内，从外侧施焊，以减少机械加工量。

若能用激光切割开槽将大大提高开槽效率和精度。

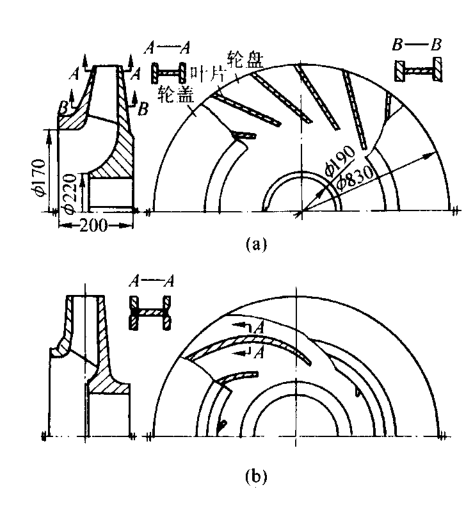
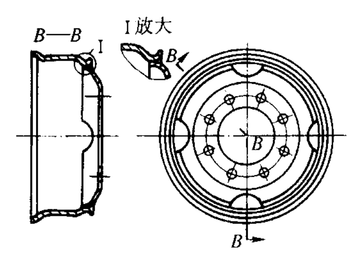


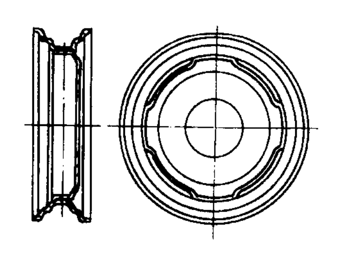
图 6.6-36　压缩机焊接叶轮

6.3　汽车轮心的焊接结构

图 6.6-37 是一般汽车轮心的焊接结构。因生产批量大，其轮缘由专门轧制的带钢经卷圆和闪光对焊制成。见表 6.6-1；辐板是外缘开孔的冲压件，它与轮缘搭接，四条角焊缝用四头熔化极气体保护焊，一次焊成。



(a) 重型车轮轮心



(b) 轻型车轮轮心

图 6.6-37　汽车焊接轮心

对于轻型的车轮轮心可采用电阻点焊，也可用摩擦焊接的结构（图 6.6-38）。

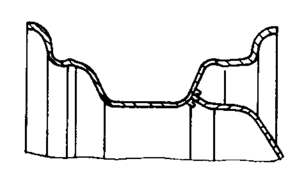


图 6.6-38　汽车轮心的摩擦焊结构

编写：陈祝年（山东大学）

第 7 章　压力容器焊接结构

1　概述

1.1　压力容器的工作特点和基本要求

压力容器是指内部或外部承受气体或液体压力，并对安全性有较高要求的密封容器。它被广泛用于石油、化工、核能、宇航、冶金、海洋、医药、轻工、纺织、食品以及城建等工业部门，是作为生产工艺过程中的反应器、换热器、分离器或贮存器等。图 6.7-1 为几种典型的焊接压力容器。

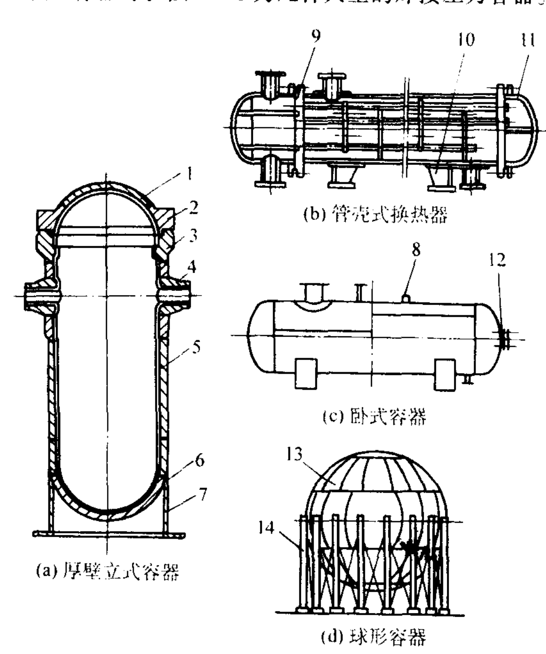


图 6.7-1　几种典型的焊接压力容器

1—顶盖；2—上法兰；3—下法兰；4—接管；5—筒体；6—下封头；7—裙座；8—管接头；9—管板；10—鞍座；11—封头；12—凸缘；13—球壳；14—支柱

压力容器工作的特点是处在易燃、易爆、高温、高压、低温、强腐蚀或强辐照等非常苛刻条件下进行工作的，有些被用来盛装有毒介质。若在使用中发生爆炸，就会造成灾难性事故。因此，防止压力容器事故的发生，始终是压力容器设计、制造和使用者的首要任务和最基本要求。

我国对于承受表压为 0.1 MPa 以上的各种压力容器实行压力容器安全技术监察制度，从设计、制造和使用三方面实行安全技术监督。设计单位须有国家主管部门颁发的设计批准书；审核人员须持有资格证书；制造单位要持有制造许可证；使用单位要持有使用证，并实行在用压力容器定期检验制度。

为了使压力容器在确保安全的前提下达到设计先进、结构合理、便于制造、使用可靠和造价经济等目的，各国都根据本国具体情况制定了有关压力容器的标准、规范和技术条件，对压力容器的设计、制造、检验和使用等各个方面提出必须严格遵守和执行的规定。如我国 1999 年颁发的《压力容器安全技术监察规程》，就是从安全角度全面概括地提出了有关材料、设计、制造、安装、使用、管理、检验、改造和修理等方面的安全技术要求和质量指标。对于面广量大的钢制压力容器也制定了综合性的国家标准，如 GB 150《钢制压力容器》、GB 151《钢制管壳式换热器》、GB 12337《钢制球形储罐》等，从设计、计算、制造、检验等方面作出了具体而明确的规定。

1.2　压力容器的分类

压力容器的种类很多，可按用途、形状、结构、材料、承压情况、器壁厚薄、筒体形状等进行分类。

(1) 按结构材料分

按用于制造压力容器的材料分有金属制压力容器和非金属制压力容器两类。前者又分钢制压力容器和非铁金属压力容器，本章介绍的是钢制压力容器。

(2) 按承压情况分

压力容器按承压情况分有外压容器和内压容器两大类。前者是指工作时容器的内压力小于外压力的压力容器，如真空容器和潜水器外壳等；后者是内压力大于外压力的压力容器，是应用最多的一类容器。内压容器按其设计压力 P 的大小又分为以下几种。

① 常压容器　($P<0.1$ MPa)

② 低压容器　(0.1 MPa$\leqslant P<1.6$ MPa)

③ 中压容器　(1.6 MPa$\leqslant P<10$ MPa)

④ 高压容器　(10 MPa$\leqslant P<100$ MPa)

⑤ 超高压容器　($P\geqslant 100$ MPa)

钢制的低、中、高压容器的设计和制造均须遵守 GB 150《钢制压力容器》的规定，都属于国家压力容器安全技术监察范围。

(3) 按形状分

压力容器按其几何形状分有以下几类。

① 圆筒形容器　这类容器制造容易，内件安装方便，承压能力较好，是应用最广的一类，是本章介绍的主要对象。

② 球形容器　由数块弓形板焊成。承压能力最好，在承受同样压力下比其他形状的容器省材料。但内件安装不方便，制造较困难。多用于一定压力下的大、中型储罐。

③ 矩形容器　由平板焊成。制造简单，但承压能力低，只作小型常压储罐。

(4) 按壁温分

按压力容器器壁的温度分有以下几类。

① 高温容器　工作时壁温超过容器材料蠕变起始温度（一般钢材为 350℃）的容器。如电站锅炉锅筒、煤转化反应器、石油精制用加氢裂化反应器等。一般选用耐热钢制造，按持久强度进行设计。

② 低温容器　工作时壁温在 -20℃以下。如储存或运载液化乙烯、液化天燃气、液氧和液氢等用的容器。一般用低温钢，按不同温度选用。如低于 -196℃，可选用奥氏体不锈钢或铝合金等。

③ 常温容器　工作时壁温处在高、低温容器之间。

(5) 按壁厚分

按压力容器的器壁厚度分有薄壁容器和厚壁容器两大类。两者一般是根据容器外直径与内直径的比值 K（D_w/D_n）大小加以区分。$K\leqslant 1.2$ 者为薄壁容器，超过这个范围者为厚壁容器。两者工作时的应力状态不同，薄壁容器看成是两向应力状态，而厚壁容器为三向应力状态，设计计算要加以区别。工程实际中以薄壁的压力容器居多。

(6) 为便于安全管理分类



我国国家质量技术监督局1999年颁发的《压力容器安全技术监察规程》中为便于安全管理，把压力容器划分为：第一类压力容器、第二类压力容器、第三类压力容器。这三类压力容器是综合考虑设计压力、容积大小和介质的危险程度等因素而进行划分的。其中第三类压力容器对设计、制造、和检验的要求最严格。

1.3 压力容器设计的内容、准则和方法

1.3.1 压力容器设计内容

压力容器设计实际上是对整个容器及组成该容器的主要受压元件的设计计算。主要受压元件包括筒体、封头（端盖）、人孔盖、人孔法兰、人孔接管、膨胀节、开孔补强圈、设备法兰、球罐的球壳板、换热器的管板和换热管、公称直径≥250 mm的接管和管法兰等。

设计内容一般包括以下几点。

1）分析压力容器的使用要求和操作条件以确定合理的结构形式。

2）选择合适的材料，规定制造工艺和质量要求。

3）按容器可能发生的失效破坏形式，确定最佳的结构尺寸，使容器各部位均能满足所需强度、刚度或不致引起断裂等的要求。

1.3.2 压力容器设计准则

压力容器由于压力或温度过高而丧失正常工作能力称为失效。压力容器的失效表现在强度、刚度和稳定三个方面。

强度方面是指容器在确定的压力（或其他外部载荷）作用下，会不会发生破坏或过量的塑性变形。例如，锅炉汽包会因内压过大而产生塑性变形，其直径不断扩大，器壁越来越薄，最后产生裂缝，导致容器破坏。

刚度方面是指容器中的受压元件由于弹性变形过大而引起容器丧失正常工作能力。例如，换热器中的管板，在介质压力作用下，如果变形过大，会使换热管变弯，从而影响传热效果。

稳定方面是指容器在外压或其他外部载荷作用下，形状发生突然改变，因而丧失其正常工作能力。例如，真空容器的器壁过薄或外压过大，突然被压瘪；又如列管式换热器中的管子，受热后膨胀，因受到两端管板的限制而产生很大的压力。温度越高这种压力越大，高到一定程度，管子就会失稳突然弯曲。

上述三种失效形式中，以强度失效问题最多也最为突出。这是压力容器设计需解决的主要问题。

钢制压力容器从开始承受压力到发生破坏大致经历三个阶段：先是弹性变形阶段，后是屈服阶段，最后是应变强化到爆破阶段。在强度设计中让压力容器在那个阶段内工作才不致失效这个问题上，出现了三种不同的失效观点，基于这三种观点就确立了三种压力容器强度设计准则。

1）弹性失效准则　认为容器器壁上受力最大点的应力强度达到材料的屈服极限（σ_s）时，容器便失去正常工作能力，即失效。以这种失效观点所确立的强度设计准则（或判据），谓弹性失效准则。这是最早也是最常用的强度设计准则，许多国家都以此准则为依据，制定适于本国用的设计标准或规范。

2）塑性失效准则　认为器壁上应力最大点的材料进入屈服阶段，并不导致整个容器破坏，因为其他部分金属仍处在弹性状态，对已经进入屈服阶段的材料要进一步塑性流动起了约束作用。只有当塑性区不断扩展到整个截面而发生全面屈服，容器才失去正常工作能力而失效。以此观点确立的强度设计准则（或判据）称塑性失效的强度设计准则。此设计准则已有少数国家应用，如美国、日本和我国等。

3）爆破失效准则　认为厚壁容器器壁很厚，而且都是用塑性较好的材料制成的，由于应变硬化，材料屈服后要进一步变形需要加更大的力，并不立即破坏。只有发生爆破，容器才是真正破坏。按此失效观点而确立的强度设计准则谓爆破失效准则，目前该准则用于厚壁容器设计上的国家尚不多。

1.3.3 压力容器设计方法

压力容器设计方法有常规设计法和应力分析设计法两种。两者的失效准则不同，但均属于许用应力设计法的范畴。分述如下。

（1）常规设计法

是压力容器过去和现在被广泛采用的设计方法。它是以弹性失效准则为依据，采用不同强度理论建立强度条件，将应力控制在许用应力以下的一类设计方法。设计时，只考虑静载荷的作用，按简化计算公式定出筒体或部件中的平均应力的大小，只要此值限制在弹性范围的某一许用应力值内，则是安全的。至于局部应力、温度或压力的波动引起的交变应力、材料中因存在缺陷引起的峰值应力等都不予考虑，或只作粗略的局部加强。为了保证安全运行，一般采用较高的安全系数。

目前在许多国家的标准或规范，如美国ASME第八篇第1分篇、英国BS5500、日本JISB8243、德国AD《受压容器规范》、我国GB 150《钢制压力容器》等中，所规定的设计方法都属于这种设计方法。它最适用于薄壁容器的设计。

（2）应力分析设计法

是以塑性失效准则为依据，以详细而严格的应力分析为设计基础，并根据各类应力的特点分别给出不同的限制条件的一种设计方法。设计时，将容器在各种条件下的应力状况进行分类，然后按各类应力的不同性质和特点具体地、有针对性地规定其许用应力范围，以达到容器在各种复杂条件下安全可靠地运行及合理地使用材料。

应力分析设计法提高了许用应力值，降低了基本安全系数。但对选材、制造工艺和检验提出更高的要求。

此种设计方法逐渐被采用，并制定有相关标准或设计规范，如美国ASME第八篇第2分篇和我国JB4732《钢制压力容器分析设计标准》。

注意，上述两种设计方法在各自标准或规范中的规定，不能混用，只能两者选择其一。

压力容器设计的一般过程是，根据工艺要求（包括工作压力与温度、操作条件等），有时还要考虑防腐、防爆以及耐辐射等其他要求，先选定结构形式和初步尺寸，然后根据强度要求确定容器的壁厚以及顶盖、封头和其他零部件的最终尺寸。设计过程需做大量的应力分析和计算工作。

1.4 压力容器中的应力分类及对其限制

按压力容器分析设计的要求，需对容器进行详细而严格的应力分析，并将各种应力加以分类，分清主次，分别根据各类应力对容器强度影响的程度，采用不同的安全系数或不同的许用应力加以限制，以保证容器在各类应力作用下安全可靠地工作。

1.4.1 应力的分类

目前压力容器中的应力比较通用的分类法是分为一次应力、二次应力和峰值应力三类。

（1）一次应力（P）

一次应力又称基本应力，是由外载引起的一类应力。外载包括：质量、内压、外压以及其他外加力（如风载等）和外加力矩（如接管力矩）等，有时还包括温度引起的应力。

这类应力的特性是：它们是结构在载荷作用下为了保持



各部分（整体和局部）平衡所必须：它们在容器的整体上或很大区域上都有分布。因此，当这类应力的应力强度（见1.4.2节）达到或超过屈服极限时，将在很大的区域上发生屈服，致使容器塑性变形越来越大，最后导致破裂。故属于"非自限性"应力。例如，内压引起薄壁圆筒的轴向应力和环向应力；球封头的经向应力和环向应力；受拘束的管子因温度变化引起的热应力等。

一次应力按其分布的均匀程度又分为一次薄膜应力和一次弯曲应力。

1）一次薄膜应力（P_m）　是沿容器壁厚均匀分布的应力。对容器危害最大，它达到屈服则整个容器都达到屈服，故对这类应力限制严格。

2）一次弯曲应力（P_b）　是扣除一次薄膜应力后在厚度方向成线性分布的一次应力。例如，平封头中部在内压作用下所产生的应力。这类应力的危害没有一次薄膜应力大，因最大应力达到屈服时，其他部分仍处在弹性状态，仍可继续承载。故这类应力在设计中允许有稍高的许用应力。

3）局部薄膜应力（P_L）　它是由内压和其他机械载荷引起的薄膜应力以及由边界效应中环向力引起的薄膜应力。这类应力沿壁厚分布均匀，但应力只发生在局部，而不是整体。由于它具有局部区域性质，故在设计中允许有较大的许用应力。

（2）二次应力（Q）

由于相邻部件的约束或结构自身约束（超静定）所引起的应力。这类应力的特性：不是满足与外力平衡，而是为了满足变形协调条件所引起。它组成自相平衡力系；具有局部性质，其分布范围比一次应力小。引起这类应力的原因是变形受到某种（外部或内部的）限制而引起。如封头与筒体连接时，在边界地区由弯矩引起的轴向应力和环向应力；一般的热应力和焊接应力等。当发生屈服时，变形变得较自由，受限制减小。所以局部地区应力和变形在屈服之后就不会继续增加，而得到缓和。故这类应力具有"自限性"。在设计中允许有较大的许用应力。

（3）峰值应力（F）

是扣除了薄膜应力和弯曲应力后，沿壁厚方向成非线性分布的那部分应力。如应力集中等。这类应力的特性是：应力分布区域很小，与容器壁厚同一量级；它不会引起整个结构的任何明显的变形，它只是产生疲劳破裂和脆断破坏可能来源之一。设计时一般不考虑，只在疲劳设计时才加以限制。

1.4.2　对各类应力的限制

（1）应力强度

压力容器各处的应力状态，一般都不是单向应力状态，而是二向或三向应力状态。在强度设计中必须根据强度理论建立各个主应力与许用应力之间的关系。

在强度条件中可以直接和许用应力进行比较的由一个或几个主应力组合成的量称相当应力或应力的当量强度—简称应力强度（S）。

应力强度 S 与应力状态中的主应力（$\sigma_1>\sigma_2>\sigma_3$）有关，也和强度理论有关：

对第一强度理论，应力强度　$S_1=\sigma_1$

强度条件为　　$S_1\leqslant[\sigma]$

对第三强度理论，应力强度　$S_3=\sigma_1-\sigma_3$

强度条件为　　$S_3\leqslant[\sigma]$

对第四强度理论，应力强度

$$S_4=\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}$$

强度条件为　　$S_4\leqslant[\sigma]$

（2）对各类应力的应力强度限制

因绝大多数压力容器都是用塑性金属材料制成，设计中可采用第三或第四强度理论。目前各国多用第三强度理论，也就是对应力强度 S_3 加以限制。

由于不同类的应力对容器危害程度不同，对它们的应力强度允许值也不相同。各国设计规范中对应力强度的限制如下：

一次应力中的薄膜应力 P_m 的应力强度应小于许用应力 $[\sigma]$；

一次应力中的局部薄膜应力 P_L 的应力强度应小于许用应力 $1.5[\sigma]$；

一次应力中的薄膜应力 P_m 或局部薄膜应力 P_L 和弯曲应力 P_b 之和 $P_m(P_L)+P_b$ 的应力强度应小于许用应力 $1.5[\sigma]$；

一次应力中的薄膜应力 P_m 或局部薄膜应力 P_L 和弯曲应力 P_b 与二次应力 Q 之和 $P_m(P_L)+P_b+Q$ 的应力强度应小于许用应力 $3[\sigma]$；

一次应力包括薄膜应力、弯曲应力与二次应力及峰值应力之和 $P_m(P_L)+P_b+Q+F$ 的应力强度不能超过由疲劳曲线所确定的疲劳许用应力 S_a。

注意，上述 P_m、P_L、P_b、Q 和 F 等是各类应力的符号，若要求出其中某类应力的应力强度，则必须先算出这一类应力的各个应力分量（同一点的正应力与剪应力），然后分别求出三个主应力（σ_1，σ_2，σ_3），最后根据第三强度理论的应力强度公式求出这一类的应力强度 S_3，才能按上列规定与许用应力进行比较。即 $S_3\leqslant(1\sim3)[\sigma]$。

2　钢制压力容器主要受压元件的强度计算

目前我国普通钢制压力容器设计、制造、检验和验收执行的是 GB 150—1998《钢制压力容器》标准。该标准在受压元件的强度设计与计算采用的是常规设计法，是基于弹性失效准则，按第三强度理论建立强度条件进行设计与计算的。

2.1　设计压力与设计温度

2.1.1　设计压力

设计内压容器时，设计压力不得小于最大工作压力。例如，对无安全泄放装置的容器设计压力可取1.0～1.10倍最大工作压力；对装有安全阀的容器则取1.05～1.10倍最大工作压力，且不小于安全阀开启压力；对装有爆破片的容器，取爆破片标定爆破压力范围的上限等。

2.1.2　设计温度

设计温度应根据传热计算或测试结果确定。如果不可能进行传热计算或实测时，可按介质的最高（或最低）温度或介质的正常操作温度附加一定余量作为设计温度。例如，容器器壁与介质直接接触且有外保温时，设计温度应按表6.7-1中的Ⅰ或Ⅱ确定。

表6.7-1　设计温度的选取

介质温度	设计温度	
	Ⅰ	Ⅱ
$T<-20℃$	最低介质温度	介质正常操作温度减0～10℃
$-20℃\leqslant T\leqslant15℃$	最低介质温度	介质正常操作温度减5～10℃
$T\geqslant15℃$	最低介质温度	介质正常操作温度加15～30℃

又例如，安装在室外且无保温的容器其壁温受环境温度控制时，其设计温度可按以下选取。

1）盛装压缩气体的容器，设计温度可按该地区气象资料，取历年来月平均最低气温（即当月各天的最低气温值相加后除以当月的天数）的最小值减3℃。

2）盛装1/4容积以上液体的容器，设计温度取月平均气温。

2.2 设计载荷

设计压力容器时应考虑各种载荷同时出现的最不利情况。各种载荷如下。

1）压力。包括设计压力、试验压力、液柱静压力。

2）重力。包括容器自重、可卸内件重、介质重、隔热材料重、试验充水重、检修重（指检修人员、检修工具及零部件等的重力）。

3）风载荷。

4）雪载荷。

5）地震载荷。

6）局部载荷。指由支座、支承环、内件、接管等在局部范围内引起的载荷。

7）偏心载荷。指悬挂装置等的中心线偏置引起的附加弯矩。

8）冲击载荷。指由于容器内介质的剧烈晃动或内件装卸时的冲撞等产生的附加载荷。

9）由于温度差和材料线膨胀系数不同而引起的热载荷。

10）容器在运输和吊装时承受的作用力。

11）容器内介质压力和温度变化引起的载荷。

2.3 安全系数与许用应力

在常规设计中，为了受压元件能安全可靠地工作，不致发生断裂，必须使它的实际工作应力小于或等于许用应力。许用应力是受压元件工作时允许的最大应力值。

在静载条件下，材料的许用应力是根据它的极限强度除以安全系数确定的。即

$$[\sigma]=\frac{\sigma_c}{n_c}$$

式中，$[\sigma]$ 为许用应力；σ_c 为材料的强度极限（对塑性材料为屈服点 σ_s 或 $\sigma_{0.2}$，对脆性材料为抗拉强度 σ_b）；n_c 为安全系数。

确定安全系数除了一般须考虑的载荷性质及其确定性、材料质量、构件的重要性、应力分析与计算精确程度等外，对于压力容器尤其重要的是温度对强度的影响。因为材料在不同的温度下其强度指标不一样，当容器操作温度等于或高于其材料的蠕变温度时，材料的强度指标是蠕变极限和持久极限，相应地其安全系数也应取不同的值。GB 150—1998标准对各类压力容器用钢规定了如表6.7-2所列的安全系数。并给出了常用钢材在不同温度下的许用应力值，可直接从该标准中查用。当温度低于20℃时，则取20℃时的许用应力。

2.4 壁厚附加量

在压力容器强度设计中须考虑壁厚附加量 C，它主要包括：钢板或钢管的厚度负偏差 C_1；容器在工作年限内由于化学腐蚀、大气腐蚀、高温氧化、电位差腐蚀等造成的腐蚀余量 C_2；容器在加工成形过程中的工艺减薄量 C_3。即

$$C=C_1+C_2+C_3$$

厚度负偏差 C_1 按相应钢板或钢管标准取。表6.7-3和表6.7-4为一般钢材标准的规定负偏差值。当钢板的厚度负偏差不大于0.25 mm，且不超过名义厚度的6%时，可取 $C_1=0$；

表6.7-2 压力容器用钢的安全系数（摘自GB150—1998）

钢材类别	常温下最低抗拉强度 σ_b	常温或设计温度下的屈服点 σ_s 或 σ_s^t	设计温度下经 10^5 h断裂的持久强度 σ_D^t		设计温度下经 10^5 h蠕变率为1%的蠕变极限 σ_n^t
			平均值	最小值	
安全系数	n_b	n_s	n_D	n_D	n_n
碳素钢、低合金钢、铁素体高合金钢	≥3.0	≥1.6	≥1.5	≥1.25	≥1.0
奥氏体高合金钢	—	≥1.5	≥1.5	≥1.25	≥1.0

表6.7-3 钢材厚度负偏差 C_1 值

mm

钢板厚度	2.0	2.2	2.5	2.8~3.0	3.2~3.5	3.8~4.0	4.5~5.5	6~7
负偏差 C_1	0.18	0.19	0.2	0.22	0.25	0.3	0.5	0.6
钢板厚度	8~25	26~30	32~34	36~40	42~50	52~60	>60~100	>100~120
负偏差 C_1	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.7

表6.7-4 无缝钢管厚度负偏差 C_1 值

钢管种类		壁厚/mm	负偏差/% 普通级	负偏差/% 高级	钢管种类		壁厚/mm	负偏差/% 普通级	负偏差/% 高级
碳素钢和低合金钢	冷拔	>1.0	10	10	不锈钢	冷拔	>1.0~3.0 >3.0	15 10	10 10
	热轧	3~20 >20	12.5 12.5	12.5 10		热轧	≤10 >10	15 20	12.5 15

对于与工作介质接触的筒体、封头、人（手）孔及内部构件等均应考虑腐蚀余量 C_2 值。一般应根据钢材在介质中的腐蚀速率和容器设计寿命确定。除有特殊要求外，塔、反应器等主要容器的设计寿命一般不少于15年；一般容器、换热器等不应少于8年。

碳素钢或低合金钢制容器的筒体和封头，当其工作介质为压缩空气、水蒸气或水时其腐蚀余量不小于1.0 mm；其他情况可按表6.7-5确定。

表6.7-5　筒体、封头的腐蚀余量 C_2

腐蚀程度	不腐蚀	轻微腐蚀	腐蚀	重腐蚀
腐蚀速率 /mm·a⁻¹	<0.05	0.05~0.13	0.13~0.25	>0.25
腐蚀裕量 /mm	0	≥1	≥2	≥3

2.5　焊缝系数

在压力容器强度设计中采用一个焊缝系数 φ 去降低母材许用应力，是为了解决由于焊缝强度与母材强度的不一致性以及焊缝形式对容器强度的不利影响。当前，由于焊接技术的进步，尤其是在压力容器制造领域内，焊缝与母材等强是焊接材料选择的基本原则，并要求对每种焊接接头通过焊接工艺评定试验证实其强度不低于相配母材强度的下限值。因此，焊缝的强度不论采用何种焊接方法和焊接工艺，只要正确选定焊接材料和焊接工艺参数，都应达到与母材强度相等。在这种情况下，焊缝系数只应与焊缝形式和焊缝无损探伤的要求有关。设计时可按表6.7-6选取。

表6.7-6　焊缝系数 φ（摘自GB 150—1998）

焊缝形式	无损探伤要求		
	全部	局部	不探伤
双面焊或相当于双面焊的全焊透对接焊缝	1.0	0.85	—
单面焊的对接焊缝，沿焊缝根部全长具有紧贴基本金属的垫板	0.9	0.8	—
无法探伤的单面对接焊缝，无垫板	—	—	0.6①

①　此系数仅适用于厚度不超过16 mm、直径不超过600 mm的壳体环向焊缝。

2.6　主要受压元件的强度计算

2.6.1　内压圆筒和球壳的壁厚计算和应力校核

受压圆筒和球壳的壁厚计算和应力校核，按表6.7-7中的公式进行。

表6.7-7　受压圆筒和球壳的壁厚计算和应力校核公式

计算项目	公式	适用范围
圆筒壁厚/mm	$\delta_e=\dfrac{PD_n}{2[\sigma]^t\varphi-P}+C$	$P\leqslant0.4[\sigma]^t\varphi$
圆筒壁应力校核	$\sigma^t=\dfrac{P(D_n+\delta_e)}{2\delta_e}\leqslant[\sigma]^t\varphi$	
球壳壁厚/mm	$\delta_e=\dfrac{PD_n}{4[\sigma]^t\varphi-P}+C$	$P\leqslant0.6[\sigma]^t\varphi$
球壳壁应力校核	$\sigma^t=\dfrac{P(D_n+\delta_e)}{4\delta_e}\leqslant[\sigma]^t\varphi$	

注：δ_e 为有效壁厚，mm；P 为设计压力，MPa；D_n 为圆筒或球壳的内直径，mm；$[\sigma]^t$ 为设计温度下母材的许用应力，MPa；σ^t 为设计温度下的计算应力，MPa；φ 为焊缝系数；C 为壁厚附加量。

2.6.2　封头壁厚计算

圆筒形容器的封头有凸形、锥形和平板形三类。平板形封头又称平盖，其结构最简单，制造最方便，但板中应力最大。当应力和直径较大时，显得非常笨重，只在压力和直径较小时采用。这里只介绍前面最常用的两类封头壁厚的计算。

（1）凸形封头

最常用的凸形封头有椭圆形封头、碟形封头和半球形封头。半球形封头壁厚的计算同前面球壳壁厚的计算。椭圆形和碟形封头如图6.7-2所示，当凹面受内压时，其壁厚的计算公式见表6.7-8。

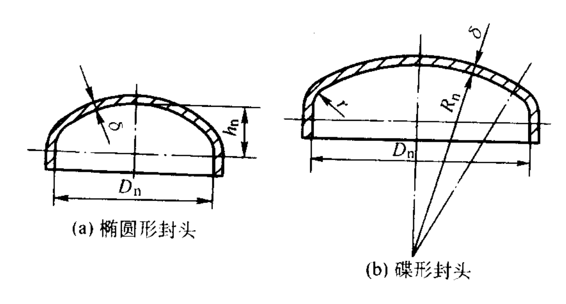


图6.7-2　椭圆形封头和碟形封头

表 6.7-8 椭圆形和碟形封头壁厚计算公式

计算项目	计 算 公 式	备 注
椭圆形封头的壁厚	$\delta_e = \dfrac{PD_n K}{2[\sigma]^t\varphi - 0.5P} + C$ (mm)	椭圆形封头的形状系数：$K = \dfrac{1}{6}\left[2 + \left(\dfrac{D_n}{2h_n}\right)^2\right]$ 碟形封头的形状系数：$M = \dfrac{1}{4}\left(3 + \sqrt{\dfrac{R_n}{r}}\right)$
标准椭圆形封头的壁厚	$\delta_e = \dfrac{PD_n}{2[\sigma]^t\varphi - 0.5P} + C$ (mm)	
碟形封头的壁厚	$\delta_e = \dfrac{MPR_n}{2[\sigma]^t\varphi - 0.5P} + C$ (mm)	

注：1. 表中符号见图 6.7-2 其余同表 6.7-7；
2. 椭圆封头的长轴与短轴之比等于2时为标准椭圆封头。

(2) 锥形封头

锥形封头的形状如图 6.7-3 所示。其锥壳壁厚 (mm) 用下式计算

$$\delta_e = \frac{PD_c}{2[\sigma]^t\varphi - P} \times \frac{1}{\cos\alpha} + C$$

式中，D_c 为锥壳大端内直径，对于无折边锥形封头 $D_c = D_n$。当锥壳由同一半顶角的几个不同厚度的锥壳段组成时，D_c 分别为各锥壳段的大端内直径。上式适用于 $\alpha \leqslant 60°$ 的情况；当 $\alpha > 60°$ 时，其厚度可按平盖计算。

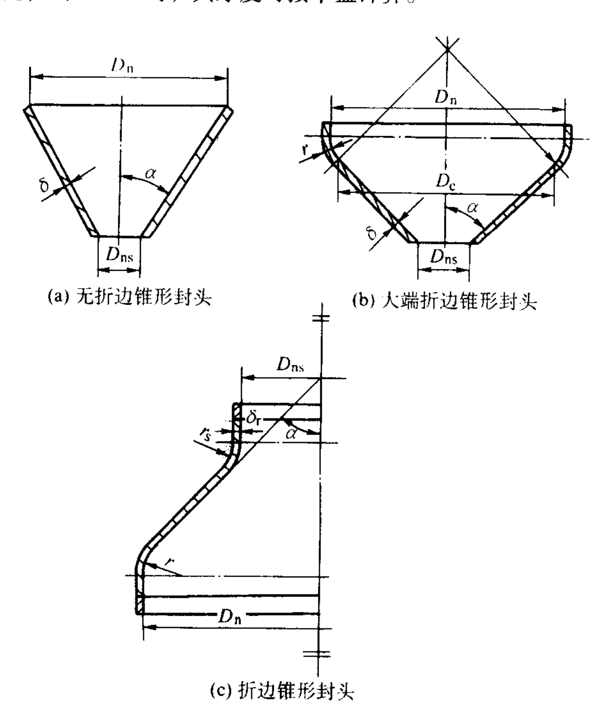


图 6.7-3 锥形封头

2.6.3 开孔及开孔补强设计

为了满足工艺操作和容器的制造、安装、检验及维修等要求，在压力容器上开孔是不可避免的。容器开孔以后，不仅整体强度受到削弱，而且还因开孔引起的应力集中造成开孔边缘局部的高应力，因此设计中必须充分考虑开孔的补强问题。

为了避免开孔引起更高的应力集中，压力容器开孔的形状一般限于圆孔和长短轴之比不大于2的椭圆孔或长圆孔。

除标准中规定允许不另行补强的小直径开孔外，容器上的开孔必须通过计算来判断是否需要予以补强。

开孔补强可以采用补强圈补强和整体补强两种结构形式。补强圈补强是以全熔透或非全熔透焊缝将内部或外部补强件与接管、壳体相焊；整体补强是增加壳体厚度，或以全熔透焊缝将厚壁接管或整体补强锻件与壳体相焊。(详见后面开孔补强结构)

开孔补强的计算方法分为等面积法和密集补强法。前者是以受拉伸的开孔大平板作为计算模型，即仅考虑容器壳体中存在的拉伸薄膜应力，且以补强壳体的一次总体平均应力作为补强原则；后者则是以壳体极限分析为基础。

等面积法是压力容器开孔补强计算中应用最广泛且较简便的方法，其计算的原则是：壳体截面因开孔被削弱的承受面积，需有补强材料予以等面积补偿。如图 6.7-4 所示，有效补强面积 A_1、A_2、A_3、A_4 之和应不小于开孔所需补强面积 A。

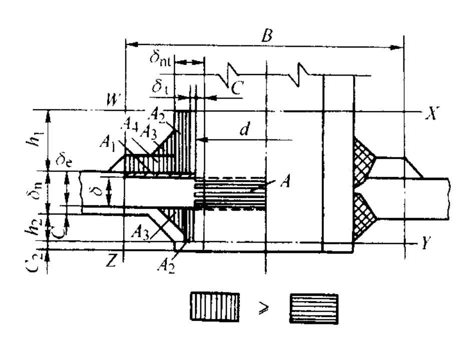


图 6.7-4 开孔补强面积示意图

若补强材料与壳体材料不同，则补强材料的许用应力小于壳体材料时，应按壳体材料与补强材料许用应力之比增加补强面积；反之，所需补强面积不得减少。

壳体开孔以后，在开孔边缘产生局部高应力。根据局部应力的分布衰减规律，在离开孔边缘较远处其应力便恢复到正常水平。为有效发挥补强材料的强度，应在开孔附近的高应力区域补强，即图 6.7-4 中有效补强范围 $WXYZ$ 内。

3 钢制压力容器用的钢材和焊接材料

3.1 常用钢材

对钢制压力容器所用钢材的基本要求如下。

1) 所选用的钢材在使用条件（如设计温度、设计压力、介质特性和操作特点）下应具有足够的强度、塑性和韧性。钢材不仅在供货状态，而且经热加工的多次热过程后仍应具有足够的强度。为了保证压力容器具有较高的抗脆断能力和满足受压元件的冷、热成形加工性能，所用钢材必须具有良好的塑性和足够的韧性储备。对于工作温度或环境温度低于0℃的压力容器用钢，必须保证在工作温度下满足一定的冲击吸收功的要求。厚钢板要注意厚度方向塑性和韧性的差别，应根据容器的工作条件确定最低的要求指标。

2) 具有优良的焊接性。压力容器绝大多数是全焊结构，所用钢材具有优良的焊接性是保证产品安全可靠的首要条件。必须严格控制钢中对焊接性有不利影响的化学成分和杂



质。《压力容器安全监察规程》中明确规定：用于焊接结构的压力容器主要受压元件的碳素钢和低合金钢，其C质量分数不应大于0.25%。在特殊条件下，如选用C质量分数超过0.25%的钢材，应限定C质量分数不大于0.45%；杂质P质量分数不应大于0.03%，S质量分数不应大于0.02%。实践表明，为了使钢材能很好地适应压力容器制造中常用的传统焊接工艺，钢的C质量分数控制在0.2%以下，尤其是对于厚板和大型锻件，控制在0.15%以下才能保证其优良的焊接性。

3）压力容器受压元件用钢应当是由平炉、电炉或氧气转炉冶炼。钢的技术性能应符合相应的国家标准、行业标准（部颁标准）或有关技术文件。

4）与受压元件焊接的非受压元件用钢，也必须是焊接性良好的钢材。

5）如果所选钢材的化学成分已超过相关标准规定，制造单位应对该钢材进行焊接性试验和焊接工艺评定，并办理规定的批准、备案手续。

压力容器常用钢材的牌号见表6.7-9。其中Q235类碳素钢的适用范围见表6.7-10。

表6.7-9　压力容器常用钢的牌号

钢材	钢　种	牌　　号
钢板	碳素钢	Q235－A·F、Q235－A、Q235－B、Q235－C、20HP、20R
	低合金钢	16MnR、16MnRC、15MnVR、15MnVRC、15MnVNR、18MnMoNbR、13MnNiMoNbR、16MnDR、09Mn2VDR、06MnNbDR、15CrMoR、12Cr2Mo1R
	高合金钢	0Cr13、0Cr19Ni9、0Cr18Ni11Ti、0Cr17Ni12－Mo2、0C19rNi13Mo3、00Cr19－Ni11、00Cr17Ni14Mo2、00C19rNi13Mo3
钢管	碳素钢	10、20、20G
	低合金钢	16Mn、15MnV、09Mn2V、12CrMo、15Cr1Mo、12Cr1MoV、10MoWVNb、12Cr2Mo、1Cr5Mo
	高合金钢	0Cr13、0Cr19Ni9Ti、0Cr18Ni12Mo2Ti、0Cr18Ni12Mo3Ti、00Cr18Ni10、00Cr17Ni14Mo2、00Cr17Ni14Mo3
锻件	碳素钢	20、25、35、45
	低合金钢	16Mn、16MnD、15MnV、09Mn2VD、12Cr1MoV、15CrMo、12Cr2Mo1、1Cr5Mo、20MnMo、20MnMoNb、35CrMo、32MnMoVB、15MnMoV
	高合金钢	0Cr13、1Cr18Ni9Ti

表6.7-10　Q235类碳素钢的适用范围

牌号	设计压力/MPa	设计温度/℃	用于壳体厚度/mm	不得盛装的介质
Q235－A·F	≤0.6	0～250	≤12	易燃或毒性为中度、高度、极度危害的介质
Q235－A	≤1.0	0～350	≤16	液化石油气、毒性为高度或极度危害的介质
Q235－B	≤1.6	0～350	≤20	毒性为高度或极度危害的介质
Q235－C	≤2.5	0～350	≤32	无限制

3.2　焊接材料

3.2.1　焊接材料的选用原则

现代钢制压力容器都是全焊结构，连接各受压元件的焊接接头，也承受着与受压元件相同的载荷、温度和工作介质的物理、化学作用。这就要求所选的焊接材料务必使其焊成的焊接接头与受压元件具有基本相同的工作性能。于是，让焊接接头具有与母材等强度、等塑性、等韧性和等耐蚀性便成为压力容器焊接材料的选用原则。

1）等强度　应理解为焊接接头的强度（指常温、高温短时或持久强度）基本上等于母材的强度，但不低于母材标准规定的下限值。对于在高温工作的受压元件，应按其最高温度下的强度指标（如高温短时抗拉强度或持久强度）选择焊接材料，而不必同时达到常温强度的规定指标。

2）等塑性和等韧性　是指焊缝金属的塑性和韧性不低于母材标准规定相应指标的下限值。这里的塑性和韧性包括高、低温的塑性和韧性，同时也包括在加工过程中的变形能力，多次热处理和长期高温运行后塑性和韧性指标的最低值。

3）等耐蚀性　是指焊接接头的耐蚀性、抗氧化性等不低于母材标准规定的指标。为此，常要求焊缝金属的合金成分与母材相近。考虑到焊接热过程会对接头耐蚀性有不利影响，应选择主要合金成分略高于母材，而含碳量低于母材的焊接材料。

3.2.2　焊接材料的具体选用

钢制压力容器常用焊接材料可参照表6.7-11和表6.7-12选用。前表用于相同钢号的焊接，后表适于不同钢号的焊



接。所选用的焊条、焊丝和焊剂均应符合国家标准规定的质　量要求。

表 6.7-11　常用钢号推荐选用的焊接材料（摘自 JB/T 4709—2000）

钢　号	焊条电弧焊		埋　弧　焊			电　渣　焊			CO_2 气保焊	氩弧焊
	焊　条		焊丝钢号（标准号）	焊　剂		焊丝钢号（标准号）	焊　剂		焊丝钢号（标准号）	焊丝钢号（标准号）
	型号（标准号）	牌号示例		型号（标准号）	牌号示例		型号（标准号）	牌号示例		
Q235－A·F Q235－A 10（管） 20（管）	E4303（GB/T 5117）	J422	H08A H08MnA （GB/T 14957）	HJ401－H08A（GB/T 5293）	HJ431	—	—	—	H08MnSi（GB/T 14958）	—
Q235－B Q235－C 20G，20g 20R，20（锻）	E4316（GB/T 5117） E4315（GB/T 5117）	J426 J427	H08A H08E H08MnA （GB/T 14957）	HJ401－H08A（GB/T 5293）	HJ431	—	—	—	H08MnSi（GB/T 14958）	—
09MnD	E5015－G（GB/T 5118）	W607	—	—	—	—	—	—	—	—
09MnNiD 09MnNiDR	—	W707	—	—	—	—	—	—	—	—
16Mn， 16MnR	E5016（GB/T 5117） E5015（GB/T 5117）	J506 J507	H10MnSi H10Mn2 （GB/T 14957）	HJ401－H08A（GB/T 5293） HJ402－H10Mn2（GB/T 5293） HJ404－H08MnA（GB/T 5293）	HJ431 HJ350 SJ101	H08MnMoA H08Mn2SiA （GB/T 14957）	HJ401－H08A（GB/T 5293）	HJ431	H08Mn2SiA（GB/T 14958）	H10MnSi（GB/T 14957）
16MnD 16MnDR	E5016－G（GB/T 5118） E5015－G（GB/T 5118）	J506RH J507RH	①	—	①	—	—	—	—	—
15MnNiDR	E5015－G（GB/T 5118）	W607	—	—	—	—	—	—	—	—
15MnNbR	E5516－G（GB/T 5118） E5515－G（GB/T 5118）	J556RH J557	①	HJ404－H08MnA（GB/T 5293）	SJ101	—	—	—	*	—
15MnVR	E5515－G（GB/T 5118）	J557	H08MnMoA H10MnSi H10Mn2 （GB/T 14957）	HJ401－H08A（GB/T 5293） HJ402－H10Mn2（GB/T 5293） HJ404－H08MnA（GB/T 5293）	HJ431 HJ350 SJ101	—	—	—	H08Mn2SiA（GB/T 14958）	H08Mn2SiA（GB/T 14957）
20MnMo	E5015－G（GB/T 5118） E5515－G（GB/T 5118）	J507RH J557	H10MnSi H10Mn2 H08MnMoA （GB/T 14957）	HJ401－H08A（GB/T 5293） HJ402－H10Mn2（GB/T 5293）	HJ431 HJ350					



续表 6.7-11

钢　号	焊条电弧焊		埋　弧　焊			电　渣　焊			CO_2 气保焊	氩弧焊
	焊　条		焊丝钢号（标准号）	焊　剂		焊丝钢号（标准号）	焊　剂		焊丝钢号（标准号）	焊丝钢号（标准号）
	型号（标准号）	牌号示例		型号（标准号）	牌号示例		型号（标准号）	牌号示例		
20MnMoD	E5016 - G（GB/T 5118）	J506RH	—	—	—	—	—	—	—	—
	E5015 - G（GB/T 5118）	J507RH								
	E5516 - G（GB/T 5118）	J556RH								
13MnNiMoNbR	E6016 - D1（GB/T 5118）	J606	H08Mn2MoA（GB/T 14957）	HJ402 - H10Mn2（GB/T 5293）	HJ350	①	HJ401 - H08A（GB/T 5293）	HJ431	—	—
	E6015 - D1（GB/T 5118）	J607								
18MnMoNbR	E6015 - D1（GB/T 5118）	J607	H08Mn2MoA（GB/T 14957）	—	HJ250G	H10Mn2MoA H10Mn2MoVA（GB/T 14957）	HJ401 - H08A（GB/T 5293）	HJ431	—	—
20MnMoNb	E6015 - D1（GB/T 5118）	J607	H08Mn2MoA（GB/T 14957）	—	HJ250G	—	—	—	—	—
07MnCrMoVR 08MnNiCrMoVD 07MnNiCrMoVDR	E6015 - G（GB/T 5118）	J607RH	①	—	SJ102	—	—	—	—	—
10Ni3MoVD	E6015 - G（GB/T 5118）	J607RH	—	—	—	—	—	—	—	—
12CrMo 12CrMoG	E5515 - B1（GB/T 5118）	R207	H13CrMoA（GB/T 14957）	HJ402 - H10Mn2（GB/T 5293） HJ404 - H08MnA（GB/T 5293）	HJ350 SJ101 HJ250G	—	—	—	—	H08CrMoA（GB/T 14957）
15CrMo 15CrMoG 15CrMoR	E5515 - B2（GB/T 5118）	R307				H13CrMoA（GB/T 14957）	HJ401 - H08A（GB/T 5293）	HJ431	—	H13CrMoA（GB/T 14957）
14Cr1MoR 14Cr1Mo	E5515 - B2（GB/T 5118）	R307H	—	—	—	—	—	—	—	—
12Cr1MoV 12Cr1MoVG	E5515 - B2 - V（GB/T 5118）	R317	H08CrMoVA（GB/T 14957）	HJ402 - H10Mn2（GB/T 5293）	HJ350	—	—	—	—	H08CrMoVA（GB/T 14957）
12Cr2Mo 12Cr2Mo1 12Cr2MoG 12Cr2Mo1R	E6015 - B3（GB/T 5118）	R407	①	—	①	—	—	—	—	—
1Cr5Mo	E5MoV - 15（GB/T 5118）	R507	—	—	—	—	—	—	—	—
0Cr18Ni9	E308 - 16（GB/T 938）	A102	H0Cr21Ni10（YB/T 5092）	—	HJ260	—	—	—	—	H0Cr21Ni10（YB/T 5091）
	E308 - 15（GB/T 983）	A107								



续表 6.7-11

钢　号	焊条电弧焊		埋　弧　焊			电　渣　焊			CO_2 气保焊	氩弧焊
	焊　条		焊丝钢号（标准号）	焊　剂		焊丝钢号（标准号）	焊　剂		焊丝钢号（标准号）	焊丝钢号（标准号）
	型号（标准号）	牌号示例		型号（标准号）	牌号示例		型号（标准号）	牌号示例		
0Cr18Ni10Ti 1Cr18Ni9Ti	E347－16（GB/T 983）	A132	H0Cr21Ni10Ti（YB/T 5092）	—	HJ260	—	—	—	—	H0Cr21Ni10Ti（YB/T 5091）
	E347－15（GB/T 983）	A137								
0Cr17Ni12Mo2	E316－16（GB/T 983）	A202	H0Cr19Ni12Mo2（YB/T 5092）	—	HJ260	—	—	—	—	H0Cr19Ni12Mo2（YB/T 5091）
	E316－15（GB/T 983）	A207								
0Cr18Ni12Mo2Ti	E316L－16（GB/T 983）	A022	H00Cr19Ni12Mo2（YB/T 5092）	—	HJ260	—	—	—	—	H00Cr19Ni12Mo2（YB/T 5091）
	E318－16（GB/T 983）	A212								
0Cr19Ni13Mo3	E317－16（GB/T 983）		—	—		—	—	—	—	H0Cr20Ni14Mo3（YB/T 5091）
00Cr19Ni10	E308L－16（GB/T 983）	A002	H00Cr21Ni10（YB/T 5092）	—	HJ260	—	—	—	—	H00Cr21Ni10（YB/T 5091）
00Cr17Ni14Mo2	E316L－16（GB/T 983）	A02	—	—	—	—	—	—	—	—
00Cr19Ni13Mo3	E317L－16（GB/T 983）	A242	—	—	—	—	—	—	—	—
0Cr13	E410－16（GB/T 983）	G202		—	—	—	—	—	—	—
	E410－15（GB/T 983）	G207								

①已有焊材，但尚未列入标准。

表 6.7-12　不同钢号相焊推荐选用焊接材料表（摘自 JB/T 4709－2000）

被焊钢材类别	接头母材类别号或组别号	焊条电弧焊		埋　弧　焊			氩弧焊	备　注
		焊　条		焊丝钢号（标准号）	焊　剂		焊丝钢号（标准号）	
		型号（标准号）	牌号示例		型号（标准号）	牌号示例		
碳素钢之间焊接	Ⅰ＋Ⅰ	E4303（GB/T 5117）	J422	H08A（GB/T 14957）	HJ401－H08A（GB/T 5293）	HJ431	H08A（GB/T 14957）	—
		E4315（GB/T 5117）	J427					
碳素钢与强度型低合金钢焊接	Ⅰ＋（Ⅱ－1）	E4303（GB/T 5117）	J422	H08A H08MnA（GB/T 14957）	HJ401－H08A（GB/T 5293）	HJ431	H10MnSi（GB/T 14957）	—
		E4315（GB/T 5117）	J427					
	Ⅰ＋（Ⅱ－2）	E4315（GB/T 5117）	J427	H08MnA（GB/T 14957）	HJ401－H08A（GB/T 5293）	HJ431	H10MnSi（GB/T 14957）	—
		E5015（GB/T 5117）	J507					
	Ⅰ＋（Ⅲ－1） Ⅰ＋（Ⅲ－2）	E4315（GB/T 5117）	J427	H08A H08MnA（GB/T 14957）	HJ401－H08A（GB/T 5293）	HJ431	H10MnSi（GB/T 14957）	—
		E5015（GB/T 5117）	J507					



续表 6.7-12

被焊钢材类别	接头母材类别号或组别号	焊条电弧焊 焊条 型号（标准号）	焊条电弧焊 焊条 牌号示例	埋弧焊 焊丝钢号（标准号）	埋弧焊 焊剂 型号（标准号）	埋弧焊 焊剂 牌号示例	氩弧焊 焊丝钢号（标准号）	备注
碳素钢与耐热型低合金钢焊接	Ⅰ+Ⅳ	E4315（GB/T 5117）	J427	H08A H08MnA（GB/T 14957）	HJ401－H08A（GB/T 5293）	HJ431	H10MnSi（GB/T 14957）	—
	Ⅰ+Ⅴ	E4315（GB/T 5117）	J427	H08A H08MnA（GB/T 14957）	HJ401－H08A（GB/T 5293）	HJ431	H10MnSi（GB/T 14957）	—
碳素钢与低温型低合金钢焊接	Ⅰ+Ⅵ	E4315（GB/T 5117）	J427	H08A H08MnA（GB/T 14957）	HJ401－H08A（GB/T 5293）	HJ431	H10MnSi（GB/T 14957）	—
强度型低合金钢的焊接	Ⅱ+Ⅱ	E5015（GB/T 5117）	J507	H08MnA H10MnSi（GB/T 14957）	HJ401－H08A（GB/T 5293）	HJ431	H10MnSi（GB/T 14957）	—
		E5515－G（GB/T 5118）	J557		HJ402－H10Mn2（GB/T 5293）	HJ350		
强度型低合金钢的焊接	Ⅱ+（Ⅲ－1） Ⅱ+（Ⅲ－2）	E5015（GB/T 5117）	J507	H08MnA H10Mn2（GB/T 14957）	HJ401－H08A（GB/T 5293）	HJ431	H10MnSi（GB/T 14957）	—
					HJ402－H10Mn2（GB/T 5293）	HJ350		
	（Ⅱ－2）+（Ⅲ－1） （Ⅱ－2）+（Ⅲ－2）	E5015（GB/T 5117）	J507	H10Mn2 H10MnSi（GB/T 14957）	HJ401－H08A（GB/T 5293）	HJ431	—	—
		E5515－G（GB/T 5118）	J557		HJ402－H10Mn2（GB/T 5293）	HJ350	—	—
强度型低合金钢与耐热型低合金钢焊接	Ⅱ+Ⅳ	E5003（GB/T 5117）	J502	—	—	—	—	—
		E5015（GB/T 5117）	J507	—	—	—	—	—
	Ⅲ+Ⅳ	E5003（GB/T 5117）	J502	—	—	—	—	—
		E5015（GB/T 5117）	J507					
强度型低合金钢与耐热型低合金钢焊接	Ⅱ+Ⅴ	E5015（GB/T 5117）	J507	—	—	—	—	—
		E5515－G（GB/T 5118）	J557	—	—	—	—	—
强度型低合金钢与耐热型低合金钢的焊接	Ⅲ+Ⅴ	E5015（GB/T 5117）	J507	—	—	—	—	—
		E5515－G（GB/T 5118）	J557					
耐热型低合金钢之间的焊接	（Ⅳ－1）+（Ⅳ－2）	E5515－B1（GB/T 5118）	R207	—	—	—	—	—
		E5515－B2（GB/T 5118）	R307					
		E309－15（GB/T 983）	A307	—	—	—	H1Cr24Ni13（YB/T 5091）	不进行热处理时采用
	Ⅳ+Ⅴ	E5515－B1（GB/T 5118）	R207	—	—	—	H13CrMoA（GB/T 14957）	—
		E5515－B2（GB/T 5118）	R307	—	—	—	—	—
		E5515－B2－V（GB/T 5118）	R317					
		E6015－B3（GB/T 5118）	R407					
		E310－15（GB/T 983）	A407	—	—	—	H1Cr26Ni21（YB/T 5091）	不进行热处理时采用



续表 6.7-12

被焊钢材类别	接头母材类别号或组别号	焊条电弧焊		埋弧焊			氩弧焊	备注
		焊条		焊丝钢号（标准号）	焊剂		焊丝钢号（标准号）	
		型号（标准号）	牌号示例		型号（标准号）	牌号示例		
珠光体钢与铁素体不锈钢焊接	（Ⅰ～Ⅳ）+Ⅷ	E309－16（GB/T 983）	A302		—	—	H1Cr24Ni13（YB/T 5091）	不进行热处理时采用
		E309－15（GB/T 983）	A307					
珠光体钢与奥氏体不锈钢焊接	Ⅰ+（Ⅶ－1）	E309－16（GB/T 983）	A302	H1Cr24Ni13（YB/T 5092）	—	HJ260	H1Cr24Ni13（YB/T 5091）	—
		E309－15（GB/T 983）	A307					
		E309Mo－16（GB/T 983）	A312	—	—	—	—	—
	Ⅱ+（Ⅶ－1）	E309－16（GB/T 983）	A302	H1Cr24Ni13（YB/T 5092）	—	HJ260	H1Cr24Ni13（YB/T 5091）	—
		E309Mo－16（GB/T 983）	A312					
	Ⅲ+（Ⅶ－1）	E310－16（GB/T 983）	A402	—	—	—	H1Cr26Ni21（YB/T 5091）	—
		E310－15（GB/T 983）	A407					
珠光体钢与奥氏体不锈钢焊接	Ⅳ+（Ⅶ－1）	E309－16（GB/T 983）	A302	—	—	—	H1Cr24Ni13（YB/T 5091）	—
		E310－16（GB/T 983）	A402	—	—	—	H1Cr26Ni21（YB/T 5091）	—
		E310－15（GB/T 983）	A407	—	—	—	H1Cr26Ni21（YB/T 5091）	—
	Ⅴ+（Ⅶ－1）	E309－16（GB/T 983）	A302	—	—	—	H1Cr24Ni13（YB/T 5091）	—
		E310－16（GB/T 983）	A402	—	—	—	H1Cr26Ni21（YB/T 5091）	—
		E310－15（GB/T 983）	A407	—	—	—	H1Cr26Ni21（YB/T 5091）	—
	Ⅵ+（Ⅶ－1）	E309－16（GB/T 983）	A302	—	—	—	H1Cr24Ni13（YB/T 5091）	—
		E309－15（GB/T 983）	A307					

注：常用钢号分类分组见表 6.7-13。

表 6.7-13 常用钢号的分类和分组

类别号	组别号	钢号
Ⅰ	Ⅰ－1	Q235－A.F，Q235－A，Q235－B，Q235－C 10（管），20 20g，20G，20R
Ⅱ	Ⅱ－1	16Mn，16MnR
	Ⅱ－2	15MnVR，15MnNbR，20MnMo
Ⅲ	Ⅲ－1	13MnNiMoNbR，18MnMoNbR，20MnMoNb
	Ⅲ－2	07MnCrMoVR

续表 6.7-13

类别号	组别号	钢号
Ⅳ	Ⅳ-1	12CrMo，12CrMoG，15CrMo，15CrMoG，15CrMoR，14Cr1Mo，14Cr1MoR，12Cr1MoV，12Cr1MoVG
	Ⅳ-2	12Cr2Mo，12Cr2MoG，12Cr2Mo1，12Cr2Mo1R
Ⅴ	Ⅴ-1	1Cr5Mo
Ⅵ	Ⅵ-1	09MnD，09MnNiD，09MnNiDR
	Ⅵ-2	16MnD，16MnDR，15MnNiDR，20MnMoD
	Ⅵ-3	07MnNiCrMoVDR，08MnNiCrMoVD，10Ni3MoVD
Ⅶ	Ⅶ-1	1Cr18Ni9Ti，0Cr18Ni9，0Cr18Ni10Ti，00Cr19Ni10
	Ⅶ-2	0Cr17Ni12Mo2，00Cr17Ni14Mo2，0Cr18Ni12Mo2Ti，0C19Ni13Mo3，00Cr19Ni13Mo3
Ⅷ	Ⅷ-1	0Cr13

4 焊接压力容器常用的结构形式

4.1 圆筒形容器

圆筒形容器的主体是由筒体和封头构成的壳体。接管、凸缘、法兰、支座等零部件直接焊到壳体上。由于筒体的制造方法随壁厚和直径大小而定，所以圆筒形压力容器又有多种结构形式。

4.1.1 钢板卷焊式容器结构

钢板卷焊式容器结构应用最为广泛。

容器的筒体是将钢板卷成圆筒节，焊好其纵缝，再用环缝将多个筒节组焊而成。这样的筒体既有纵焊缝又有环焊缝，多用于中、低压的压力容器。随着工作压力增加，容器的壁厚也随之增大，目前板厚在 150 mm 以下的筒节多采用卷板机制成；150 mm 以上的筒节则采用大吨位液压机压制成形，视筒节直径大小，可由一条或多条纵缝焊接而成。

封头用液压机将钢板冷冲压或热冲压制成半球形、椭圆形或蝶形。各类接管可采用无缝钢管或锻件直接与筒体（或封头）相焊接。

钢板卷焊式容器结构制造工艺简单，材料利用率高，制造周期短，生产成本低。图 6.7-5 示出典型的结构。

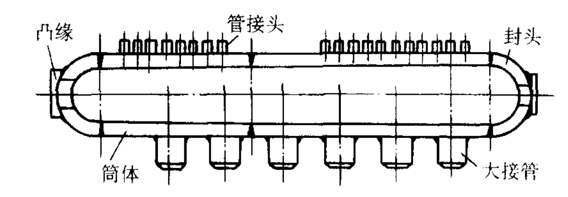


图 6.7-5 30 万千瓦电站锅炉的锅筒结构示意图

4.1.2 单层锻焊式容器结构

单层锻焊式容器结构主要用于像炼油厂与核反应堆中的高压厚壁容器。这类容器的筒体是将钢锭锻成筒节，再由筒节组焊而成。封头也用锻压制造。因此整个壳体上只有环形焊缝，无任何纵向焊缝。不仅减少制造时焊接工作量，而且大大降低了容器在役检查工作量。

制造这类容器需有大型锻压设备。容器直径越大，锻造越困难。图 6.7-6 为典型实例。

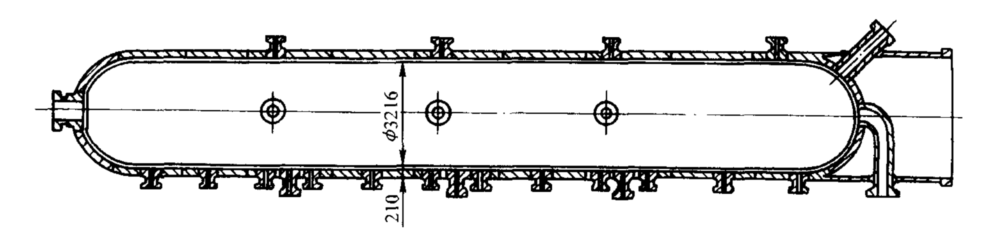


图 6.7-6 560 t 热壁加氢裂化反应器壳体

4.1.3 多层式容器结构

多层式容器结构主要用于厚壁容器。高压容器的壁厚往往超过制造厂卷板机能力，可以利用薄板组合，制成设计所要求的壁厚。按组成厚壁筒体的方式不同，分多层包扎、多层热套和多层缠绕等结构形式。

（1）多层包扎

多层包扎式容器的筒体是由内筒和在其外面包扎的多层层板构成筒节，再将筒节组焊而成。图 6.7-7 是这种容器的主要制造工序和结构示意。

内筒厚度一般为 12 ~ 25 mm，外层层板厚一般为 6 ~ 12 mm。先用钢板卷焊成内筒，后将层板同心地包扎在内筒外面，用钢丝绳将层板捆紧于内筒上，再后焊接层板纵缝，借包扎力和纵焊缝的横向收缩力使层板与内筒相互贴紧，使得内筒产生一个预加的压缩应力（有利于筒体工作应力沿壁厚均匀分布，可提高其强度）。第一层层板包扎和焊接后，再用同样的方法包扎和焊接后面各层（每层纵缝位置错开），直到所需壁厚度为止。这种结构无深厚纵焊缝，但有深厚环焊缝。其优点是制造设备简单，材料选用灵活，可按介质腐蚀性选内筒材料，层板选用一般的压力容器用钢。一旦层板产生裂纹，只能在该层扩展，不会扩展到别的层上，其抗脆性断裂优于单层厚板的结构。每个筒节的层板上开通气孔，用来监测内筒的泄漏，以防事故，安全性高。缺点是生产工序多，劳动生产率低；壁温一般不应超过 200℃；环焊缝是薄弱环节，其接头设计和施焊要特别精心。

（2）多层热套

多层热套式容器的筒体是在内筒外面套合一层至数层外筒构成筒节，再用环焊缝将筒节组焊而成。图 6.7-8 是这种容器的主要制造工序和结构示意图。



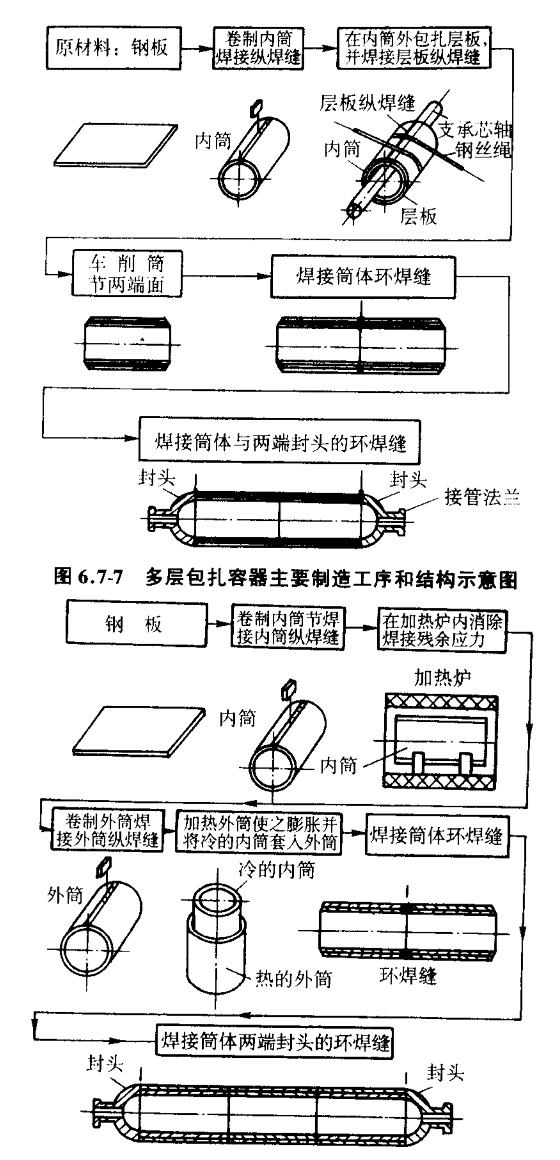


图 6.7-7　多层包扎容器主要制造工序和结构示意图

图 6.7-8　多层热套式容器主要制造工序和结构示意图

这是利用两圆筒间的过盈配合使内筒产生预压应力的又一种方法。通常是加热外筒，使外筒内径超过内筒外径时套进内筒，为了使内外筒达到一定温度差，也可冷却内筒使之收缩，以减低外筒的加热温度。内筒和外筒的厚度一般相同，常用中厚板（25~50 mm）卷焊而成。

热套式压力容器用的钢板比多层包扎式压力容器的层板厚，层数少（一般2~3层，多达5层），故生产效率比多层包扎式的高，容器壁厚和尺寸不受生产设备限制，制造简便。使用的中厚钢板质量较均匀，性能优良，其抗脆性破坏能力优于单层厚壁容器。

（3）多层缠绕

多层缠绕式容器又分绕板式、绕带式和绕丝式等结构。

1）绕板式结构　将3~5 mm厚的成卷薄钢板，连续地以螺旋形方式缠绕于内筒外面，绕到所需厚度为止。然后在外面用机械方法包上一层厚为10 mm左右的两块或三块瓦片钢板，并焊接纵缝，从而构成筒节，后再将筒节组焊成筒体。这种容器结构的优点与多层包扎相同，但焊接工作量较少，因它不必逐层包扎层板和焊接每层层板的纵向焊缝。故能缩短生产周期和降低生产成本。

2）绕带式结构　按所绕钢带的截面形状又分型槽绕带式和扁平绕带式两种结构。前者带面有沟槽，后者带面是平的。

① 型槽绕带式压力容器　图 6.7-9 为这种容器主要制造工序和结构示意。在绕带机床上对型槽钢带通电加热到红热状态，再用压辊将钢带压合到内筒表面上预先加工出的螺旋沟槽内，使之相互啮合。每绕完一层钢带后再绕下一层，直到所需的筒体厚度为止。这种结构的特点是：型槽钢带层层啮合，可使钢带层承受容器的一部分轴向力；筒体上没有贯穿整个壁厚的环焊缝；使用安全性高。但缺点是需要使用特殊轧制的型槽钢带和专用机床。

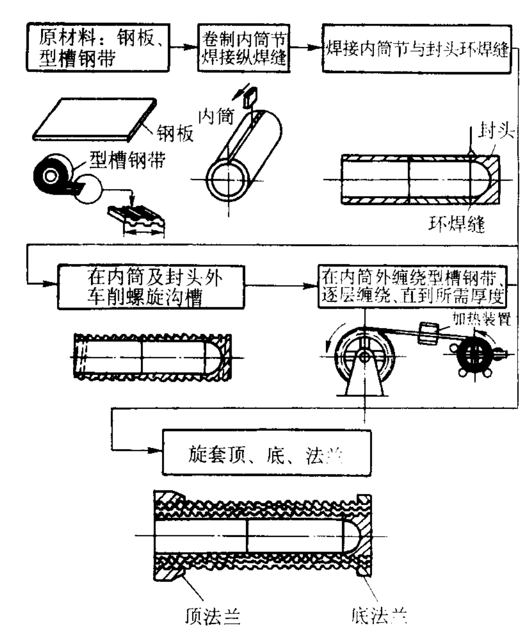


图 6.7-9　型槽绕带式容器的主要制造工序和结构示意图

② 扁平绕带式压力容器　将不带沟通槽的扁平钢带按一定倾角逐层交错缠绕在内筒外面，构成筒体所需厚度。扁平钢带的规格一般厚度为4~8 mm，宽度为40~120 mm。内筒厚度比型槽绕带式压力容器的内筒薄，而且无需用大型机床加工内筒外表面的沟槽，绕制设备较为简单。这类结构多用于小化肥中的高压容器。

3）绕丝式　将高强度扁钢丝按一定的预拉紧力，并一层一层地错开螺旋缠绕在内筒外面，直到所需厚度即成筒体。

以上七种筒体结构通常是按操作条件、制造水平、材料供应、安全可靠程度以及经济合理性等综合分析后选定。

4.2　球形容器

球形压力容器的本体是空心球壳，多用于储存气、液物料。又称球罐。按形状分为圆球形和椭球形；按壳体层数分有单层、多层、双金属层和双重壳等结构。以单层圆球形容器应用最广泛。

为了便于设计与制造，通常沿球体纬线划分成一些带，又沿经线划分成球瓣。因此，整个球壳实际上是由压制成球形曲面的球瓣拼焊而成。球瓣的分割形式主要有橘瓣式、足球式和混合式三种，如图 6.7-10 所示。采用较多的是前后

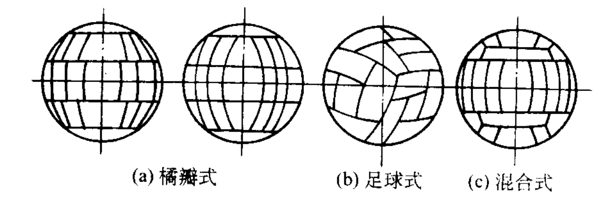
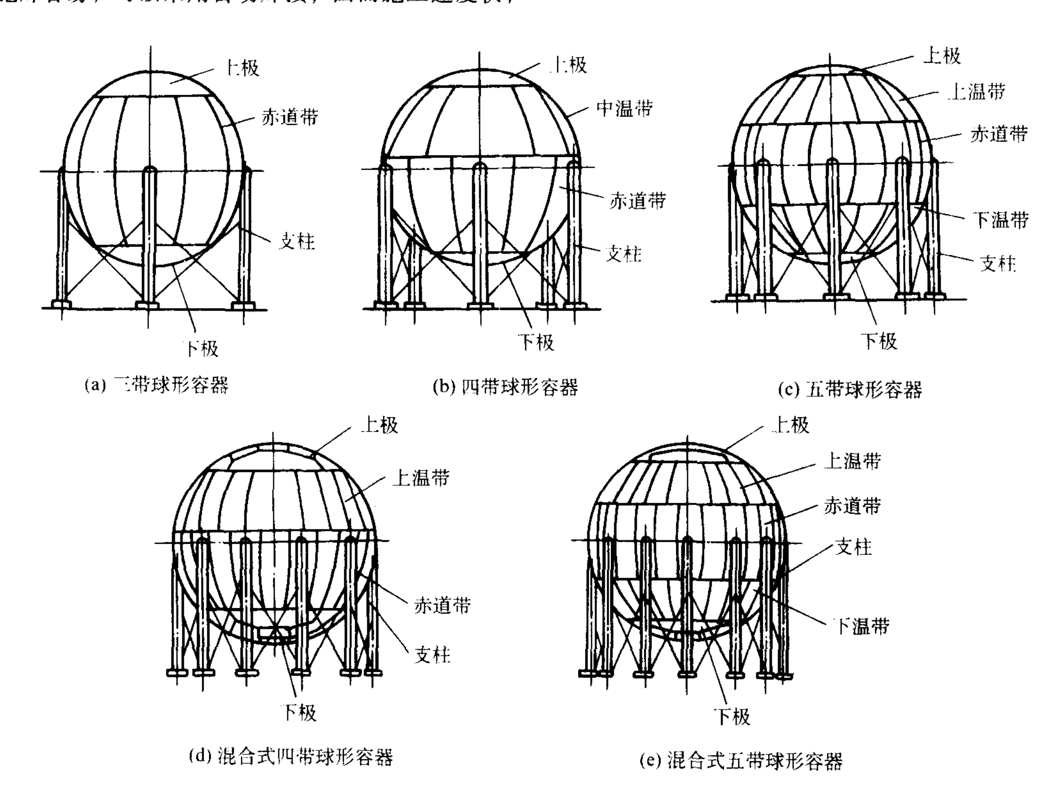


图 6.7-10　球形容器壳体的分割形式

两种形式。球瓣的形状和尺寸大小是综合考虑压制能力、焊接施工方便、板材利用率和起重运输条件等因素后确定的。各分瓣之间全部采用对接接头连接。由于橘瓣式球壳的焊缝较规则，施焊容易，可以采用自动焊接，因而施工速度快，故是应用最多的一种结构形式。图 6.7-11 为橘瓣式和混合式容器的典型结构。它们均沿纬线划分成赤道带，上、下温带，上、下极带几个组成部分。



(a) 三带球形容器　(b) 四带球形容器　(c) 五带球形容器

(d) 混合式四带球形容器　(e) 混合式五带球形容器

图 6.7-11　桔瓣式和混合式球形容器结构

5　压力容器常用焊接接头的设计

5.1　设计要点

5.1.1　接头形式

压力容器结构中常用的焊接接头有对接接头、T 形接头和角接头三种。

对接接头在工作应力分布、焊接和无损探伤等方面最为理想，应优先选用。容器壳体自身拼接的对接接头应全焊透。由于构造原因，容器上有些部位，如接管、凸缘与壳体、法兰与接管，管板与壳体之间的连接，须采用 T 形接头或角接头。这两种接头工作应力复杂，应力集中较严重，若用于重要容器，例如用于高温高压、低温或交变载荷等条件下工作的容器上，也应全焊透。其焊缝表面向母材应平滑过渡，以减少应力集中。必要时，可以改变局部结构，使之变成对接接头。

在压力容器中一般不使用搭接接头，它弊多利少。只能有条件地使用，如用于常温低压的薄壁容器的不重要的部位上。

所设计的各种接头均应符合国家标准 GB/T 985《气焊、手工电弧焊及气体保护焊焊缝坡口的基本形式与尺寸》和 GB/T 986《埋弧焊焊缝坡口的基本形式与尺寸》的要求。

5.1.2　焊缝布置

焊缝或焊接接头，应处在容器上最合理的位置。这里涉及容器上如何正确划分零、部件和制备大型零件却因受钢材尺寸限制而需合理拼接等问题。从焊接角度，一般要求如下。

1）避免焊缝密集。一般不用十字焊缝。例如，相邻筒节对接其纵缝应互相错开，错开距离应大于名义板厚 δ_n 的 3 倍，且不小于 100 mm。在 T 形焊缝部位，必须进行探伤；当封头由瓣片和顶圆板拼接制成时，焊缝方向只允许是径向和环向的。径向焊缝之间最小距离和上述相同，见图 6.7-12。

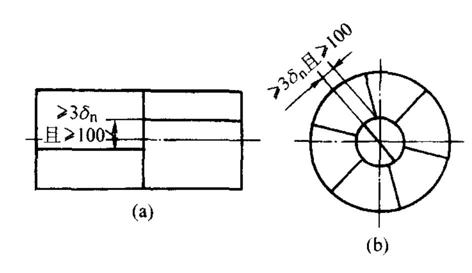


图 6.7-12　避免十字焊缝的设计

2）避免焊缝落在结构上高应力区或截面有突变的部位。凸形封头与筒体两曲面汇交处是应力复杂区，图 6.7-13a 的设计应避免。一般要求凸形封头与筒体连接处作出直边，如图 6.7-13b。这样焊缝既避开应力复杂区，又便于施焊和焊缝质量检验。平封头与筒体的连接应避免图 6.7-13c 的设计，若能把角接头改成对接接头，如图 6.7-13d，最为理想。不等厚板的对接，接管和管板与筒体之间的连接，都需要考虑类似的问题。详见后面接头设计。

3）避免在焊缝及其附近开孔。必须开孔时，对开孔处两侧的焊缝须经探伤检查合格。

4）要同时有利于提高材料利用率和减少焊接工作量。

5）有利于施焊和焊缝质量检验。

5.1.3　焊缝类型

在压力容器中焊缝是按其在容器上受力状态和所处的位置进行分类的。对工作条件、直径、壁厚等不同的容器，在



同一位置的焊缝，其类别均相同。不同类别的焊缝，规定出不同的技术要求和质量标准；在强度计算中其焊缝系数取值亦有区别。我国在GB150《钢制压力容器》中将压力容器各位置的焊缝分为A、B、C、D四类，见图6.7-14。并作出相应的使用条件、装配公差、无损检测和焊缝系数等一系列规定。

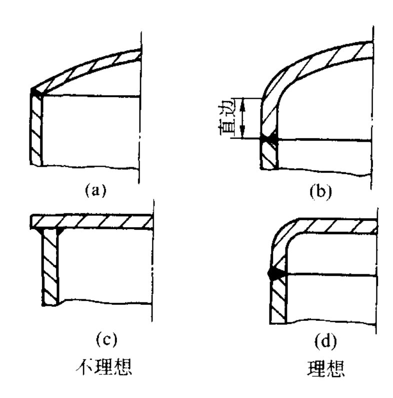


图6.7-13 避免焊缝落在结构局部几何变化部位的设计

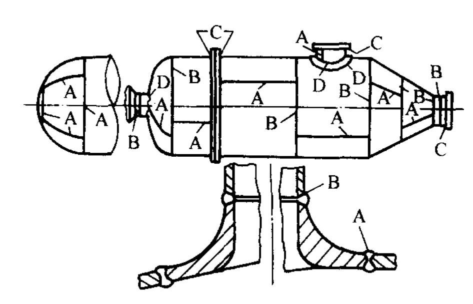


图6.7-14 压力容器上焊缝的分类

1）A类焊缝 指壳体、连通受压室、接管和直径过渡段上的纵向焊缝；球壳、成形封头、平封头和平板容器和侧板上的任何焊缝；球形封头与主壳体、直径过渡段、接管、连通受压室相连接的环向焊缝；镶嵌式锻制接管与筒体或封头间的对接焊缝。

2）B类焊缝 指主壳体、连通受压室、接管和直径过渡段上的环向焊缝（含过渡段的大小端与圆筒体间的焊缝）；成形封头（不含球形封头）与主壳体、直径过渡段、接管、连通受压室相连接的环向焊缝。

3）C类焊缝 指法兰、翻边搭环、管板、平封头与主壳体、成形封头、直径过渡段、接管、连通受压室相连接的焊缝；平板容器各侧板间相连接的焊缝。

4）D类焊缝 指接管、人孔圈、手孔盖、加强圈、法兰与主壳体、球壳、直径过渡段、封头、平板容器间相连接的焊缝；接管与受压室相连接的焊缝（直径过渡段小端与接管的连接属B类焊缝）。

A、B类焊缝主要是对接接头的焊缝（即对接焊缝），前者受力状态相对比后者严峻些；C、D类焊缝主要是角接头或T形接头的焊缝（即角焊缝），后者受力状态较前者复杂。对接焊缝的焊接和检验方便，质量容易控制，而角焊缝要困难得多。因此，在设计和制造中对不同类型的焊缝应有不同的要求。以同为对接接头中的A、B类焊缝为例，对A类焊缝质量要求比B类焊缝更为严格。标准要求两者同样要采用双面或相当于双面的全焊透的对接焊缝。若要用单面焊的对接焊缝，则须运用能保证全焊透且背面具有良好焊缝形状的焊接技术，如采用氩弧焊封底的单面焊背面成形的焊接工艺或背面加衬垫的施焊技术等。不同的是，当使用加垫板的单面焊时，焊后的A类焊缝须去除背面的垫板并保证背面光洁；而B类焊缝若受条件限制，允许焊后不拆除垫板。从质量要求上保证了A类焊缝优于B类焊缝。

在装配质量上，A、B类焊缝的对口错边量亦有不同规定，见表6.7-14。

压力容器上一般避免采用十字焊缝。因此，带有A类焊缝的圆筒节和封头，当两圆筒节之间或封头与圆筒节之间对接时，要求焊缝错开一段距离，见图6.7-12的规定。

各种类型焊缝的外表和内部质量，也按压力容器的类型和级别，提出相应的要求。表6.7-15为一般容器A、B类焊缝余高的规定。凡符合下列条件之一的压力容器，其A、B类焊缝应作100%的射线照相检查或超声波探伤：

① 壳体名义壁厚大于38 mm的碳素钢、大于30 mm的16MnR钢、大于25 mm的15MnVR或奥氏体不锈钢、大于16 mm的12CrMo钢等制作的容器。

② 壳体材料标准抗拉强度大于540 MPa的高强钢或合金元素大于3%的Cr-Mo合金钢制作的任何厚度的容器。

③ 多层包扎容器的内筒、热套压力容器各单层圆筒。

④ 壳体壁厚大于25 mm，工作温度低于-40℃的低温压力容器。

⑤ 须进行气压试验的容器或盛装极度危害或高度危害介质的容器，等等。

允许作局部探伤的A、B类焊缝，其检查长度不得少于所检焊缝长度的20%，且不得小于250 mm。T形焊缝处必须进行100%探伤。

C、D类焊缝应有圆滑过渡到母材的几何形状。对下列情况的C类或D类焊缝表面应进行磁粉或渗透探伤检查：

① 材料标准抗拉强度大于540MPa的容器。

② 壳体名义厚度大于16 mm的12CrMo、15CrMo钢制容器，其他任意厚度的Cr-Mo低合金钢制容器。

③ 层板材料标准化抗拉强度大于540 MPa的多层包扎压力容器的层板C类焊缝。

表6.7-14 A、B类焊缝对口错边量的规定

mm

对口错边示意图	对口处名义厚度 δ_n	对口错边量b	
		A类焊缝	B类焊缝
（示意图：δ_n、b）	$\leqslant 12$	$\leqslant 1/4\delta_n$	$\leqslant 1/4\delta_n$
	$12 < \delta_n \leqslant 20$	$\leqslant 3$	$\leqslant 1/4\delta_n$
	$20 < \delta_n \leqslant 40$	$\leqslant 3$	$\leqslant 5$
	$40 < \delta_n \leqslant 50$	$\leqslant 3$	$\leqslant 1/8\delta_n$
	> 50	$\leqslant 1/16\delta_n$ 且 < 10	$\leqslant 1/8\delta_n$ 且 < 20

注：1. 表中A类焊缝的对口错边量要求不包括球形封头与圆筒连接的环向焊缝以及嵌入接管与圆筒或封头的对接焊缝；
2. 表中B类焊逢的对口错边量要求包括球形封头与圆筒连接的环向焊缝。

表 6.7-15　A、B 类焊缝余高的规定　mm

焊缝余高示意图	焊缝深度① δ (δ_1)	焊缝余高 e (e_1)	
		焊条电弧焊	自动焊
	$\leqslant 12$	0 ~ 1.5	0 ~ 4
	$12 < \delta \leqslant 25$	0 ~ 2.5	0 ~ 4
	$25 < \delta \leqslant 50$	0 ~ 3	0 ~ 4
	> 50	0 ~ 4	0 ~ 4

① 焊缝深度：对单面焊为母材厚度；对双面焊为坡口直边部分中点至母材表面的深度，两侧分别计算。

5.2　容器壳体的对接接头设计

5.2.1　单层容器壳体

容器壳体上的对接接头，无论是 A 类或 B 类焊缝，均要求焊透，且无内部缺陷，外部成形美观，焊缝表面向母材平滑过渡，以减少应力集中。为此，应采用双面焊。当条件不允许时，才采用单面焊；应根据焊接方法和板厚在对接边缘上作出坡口。坡口的形状和尺寸以保证焊透、便于施焊、易于控制焊接变形、节省填充金属和减少加工费用为原则进行设计。图 6.7-15 列举几种最常用的对接接头形式。图 6.7-15a、b 为双面焊的对接接头，如果有一面焊接条件较差，则设计不对称的坡口形状，焊接条件差的一面作填充金属量小的坡口，见图 6.7-15b。图 6.7-15c ~ f 均为单面焊的对接接头。为了保证充分焊透又具有良好的背面成形，采用氩弧焊或等离子弧焊作封底焊的坡口形式，见图 6.7-15c、e；图 6.7-15d、f 为加垫板坡口形式。此外，要注意下列四种对接接头设计。

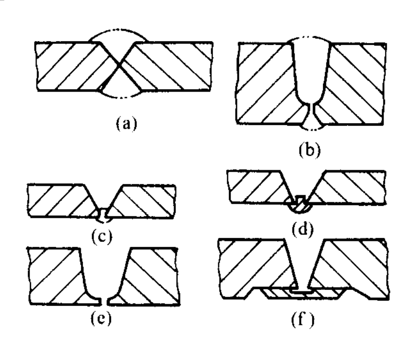


图 6.7-15　压力容器对接接头形式

(a) 对称双面焊接头；(b) 非对称双面焊接头；(c)、(e) 氩弧焊封底的单面焊接头；(d)、(f) 加衬垫的单面焊接头

(1) 不等厚钢板对接接头设计

为了防止截面出现突变，减少应力集中，并有利于无损检验，应作如下处理。

① 若薄板厚度不大于 10 mm、两板厚差超过 3 mm 时；若薄板厚度大于 12 mm、两板厚差大于薄板厚度的 30%，或超过 5 mm 时，均应按图 6.7-16 的要求单面或双面削薄厚板边缘。

② 当板厚差小于上述数值，则对口错边量 b 按表 6.7-14 要求，且 b 以较薄板厚度为基准确定。

(2) 复合钢板对接接头设计

复合钢板是由较薄的不锈钢作复层与较厚的低碳钢或低合金钢作基层复合而成，其中复层厚度只占总厚度的 10% ~ 20%。这里遇到异种钢焊接问题。一般采用 Y 形或双 Y 形坡口双面焊的对接接头，见表 6.7-16。先焊基层，再焊过渡层，最后焊覆层，分别使用不同的焊接材料。

(3) 厚壁容器对接接头设计

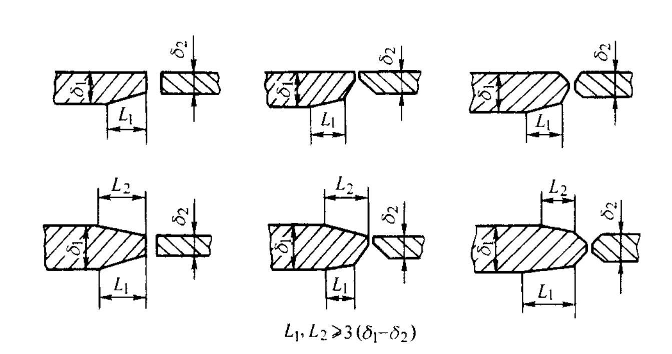


图 6.7-16　不等厚板对接接头设计

单层锻焊结构容器，如加氢反应器、核反应堆压力壳等，均属高压厚壁容器。壳壁厚约 150 ~ 240 mm，环缝对接质量要求高。设计时应着重考虑减少坡口截面积和内外两侧坡口的比例。尽量减少焊缝金属的填充量和内侧坡口的焊接工作量。常用坡口形式及其特点见表 6.7-17。选用时应根据焊接方法、设备和清焊根条件、焊接材料及生产周期等因素综合考虑。

(4) 球罐壳体对接接头设计

在工地上组装和焊接的大型球罐，其球壳对接接头设计必须考虑现场施工条件。接头坡口形式取决于板厚、焊接方法、焊缝所在位置、焊接应力和变形控制、施焊和背面清根的条件等。壁厚小于 6 mm 时，焊条电弧焊一般用 I 形坡口双面焊透；6 ~ 18 mm 用 Y 形或双 Y 形坡口双面焊透，前者角变形不易控制；大于 20 mm 应用双 Y 形坡口。因内部施焊条件差，多采用外大内小的不对称双 Y 形坡口。考虑到外侧清根条件好，有时在上温带环缝以上的焊缝采用外小内大的不对称双 Y 形坡口。坡口角度应在满足焊条摆动和清根方便的前提下，尽可能取小些，以减少填充金属量。表 6.7-18 为国内外球壳对接接头的坡口形式和尺寸。

5.2.2　多层容器壳体

(1) 内筒的对接接头设计

多层容器的内筒和多层热套容器各层的圆筒，若用钢板卷焊方法制备，则纵向对接接头设计与单层容器对接接头设计的要求相同，其焊缝属 A 类。内筒之间的对接环焊缝则按 B 类焊缝要求，均应焊透。

(2) 等厚圆筒间对接接头设计

这类接头的焊缝属 B 类，要求双面焊或带垫板的单面焊全焊透。图 6.7-17 示出几种接头形式可供参考。图 6.7-17a、b 适于多层圆筒与单层圆筒之间的对接；图 6.7-17c、d、e、f、g 适于多层圆筒之间的对接；图 6.7-17h、i 适于具有不锈钢内筒的多层圆筒间对接接头坡口形式。

(3) 不等厚圆筒间对接接头设计

这类接头须有斜坡过渡，图 6.7-18 提供其过渡的结构形式。图 6.7-18a、b 适于同为多层圆筒间连接；图 6.7-

18c～f适于多层圆筒与单层圆筒间连接。接头坡口形状见图 6.7-18。

表 6.7-16 复合钢板对接接头形式

坡口名称	坡口形式	焊条电弧焊或焊条电弧焊封底、自动焊坡口尺寸/mm							适用范围
		δ	p	b	H	R	α	β	
Y形		4～6	2	2	—	—	70°	—	复合钢平板对接，筒体纵、环缝对接
Y形		8～12	2	2	—	—	60°	—	
双Y形		14～25	2	2	8	—	60°	60°	
带钝边U形		26～32	2	2	8	6	15°	60°	

表 6.7-17 厚壁单层容器环向焊缝接头坡口形式

坡口形式	焊接方法	尺寸参数/mm	特点
	内壁焊条电弧焊 外壁埋弧自动焊	$\alpha=8°$ $\beta=15°$ $R=10\pm1$ $\alpha_1=10°$ $s_2=50\pm5$ 当$\delta=200$时 $b=70$ $p=2\sim3$	1）坡口尺寸较大，操作方便，对焊接设备和焊剂的工艺性能无特殊要求 2）采用双角度坡口，根部坡口角度较大，有利于脱渣及防止自动焊时坡口侧面产生未熔合缺陷 3）焊缝断面面积大，填充金属多，焊道数量多，生产效率低，焊接应力大，热影响区宽。但内壁焊条电弧封底焊后，外壁清根方便
	双面埋弧自动焊	$\alpha=4°$ $\beta=15°$ $R=10\pm1$ $p=8\pm1$ $s_2=30\pm5$ 当$\delta=200$时 $b=50$	1）坡口角度较小，要求导电嘴较扁并具有绝缘层，要求焊剂有较好的脱渣性能 2）采用双角度坡口，利于脱渣及防止未熔合 3）采用双面埋弧自动焊，生产效率高，但需有内伸式埋弧焊机。因内壁埋弧自动焊，预热连续焊时，劳动条件稍差。故s_1应尽量取较小尺寸 4）焊缝断面面积较小。外壁清根较方便
	内壁焊条电弧焊 外壁埋弧自动焊	$\alpha=5°$ $R=10\pm1$ $\alpha_1=60°\pm5°$ $p=2\sim3$ $s_1=14\pm1$ 当$\delta=200$时 $b=45$	1）采用单角度小坡口，要求导电嘴较扁并具有绝缘层。对焊剂的工艺性能特别是脱渣性要求较高 2）坡口加工比双角度坡口方便，内壁手工封底焊后，外壁需采用特殊的深坡口清根设备 3）内壁焊条电弧焊工作量小，s_1较小 4）焊缝断面积较小

续表 6.7-17

坡口形式	焊接方法	尺寸参数/mm	特 点
	单面埋弧自动焊	$\alpha = 5°$ $R = 10 \pm 1$ $p = 2 \sim 3$ 当 $\delta = 200$ 时 $b = 50$ $h = 5 \sim 12$	1）采用单角度小坡口，要求导电嘴较扁并具有绝缘层，对焊剂的脱渣性能要求较高 2）采用单面埋弧自动焊，劳动条件好，不需清根 3）内壁需装衬垫及留加工余量，焊后需用机加工切除，母材消耗较多，增加机加工工序
	外壁埋弧自动焊 内壁在碳弧气刨清根焊条电弧焊	$\alpha = 4°$ $\beta = 15°$ $R = 6 \pm 1$ $p = 6 \pm 1$ $s_1 = 40 \pm 5$ 当 $\delta = 200$ 时 $b = 45$	1）采用双角度坡口，易保证根部焊接质量 2）内壁采用碳弧气刨清根，不需深坡口外壁清根装置 3）焊缝断面面积较小
	窄间隙埋弧自动焊	$\alpha \leqslant 1°$ $R = 10 \pm 1$ $p = 8$ 当 $\delta = 200$ 时 $b_1 = 21$ $b_2 = 18$	1）采用窄间隙坡口，焊缝断面面积小，线能量小，填充金属少，热影响区窄，焊接应力小，变形小 2）需采用特殊的窄间隙埋弧焊机和跟踪对中装置 3）内壁采用焊条电弧焊坡口或加衬垫，外壁焊妥后，内壁清根，不需特殊的深坡口清根装置
	窄间隙气电焊	$b = 9 \pm 1$ $p = 6$	1）采用窄间隙坡口，间隙较埋弧自动焊更小，焊缝断面面积更小，优点更为突出 2）需采用特殊的窄间隙气电焊装置，不需要焊剂，但需有保护气体及相应的装置 3）内壁采用衬垫，或留加工余量，不需外壁深坡口清根装置
	真空电子束焊		1）采用无间隙坡口，需采用大型真空电子束装置，设备投资费用大 2）不需任何焊接材料，焊接接头质量高，热影响区小，焊接应力、变形极小，生产效率高，劳动条件好

表 6.7-18 球罐壳体对接接头坡口形式和尺寸

接头示图	焊接方法	坡口形式	坡口尺寸/mm					
			δ	H	p	b	α	β
	埋弧焊	Y形	16~20	—	7	0^{+1}	70°	—
		双Y形	20~28	6	6	0^{+1}	70°	70°
			30~40	10	6	0^{+1}	70°	70°
	焊条电弧焊	Y形	6~18	—	2	2	65°~70°	—
		双Y形	20~50	$\delta/3$	2	2	65°~70°	65°~70°
	焊条电弧焊	双Y形	30~50	$(0.3\sim0.4)\delta$	2	0~3	50°	90°
	焊条电弧焊	双Y形	30~50	0.4δ	2	5	50°	50°

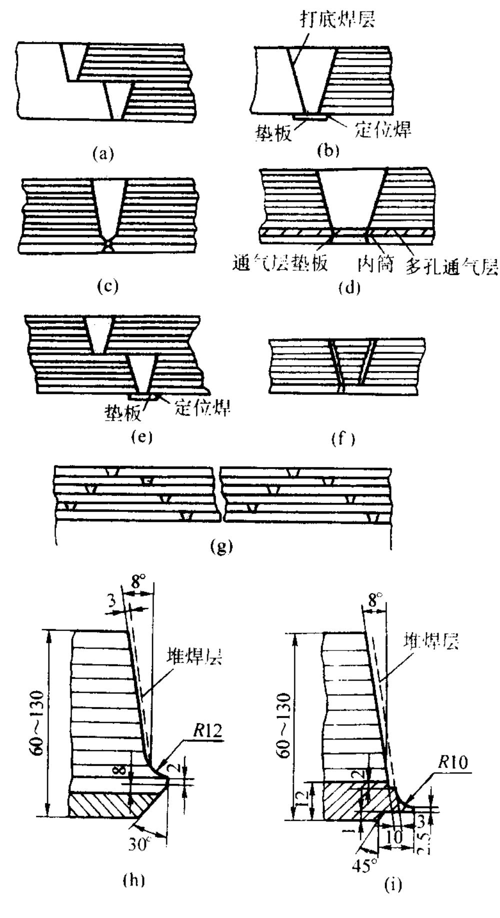
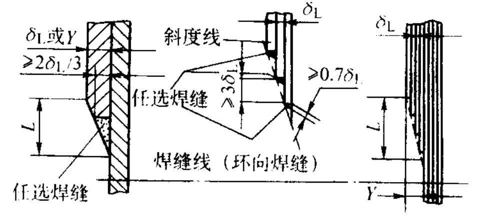
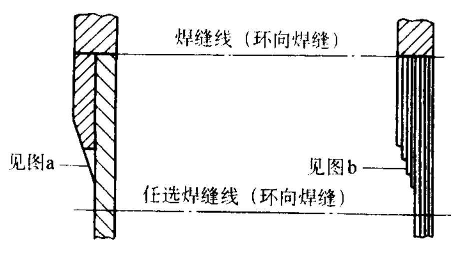


图 6.7-17　等厚圆筒间对接接头形式





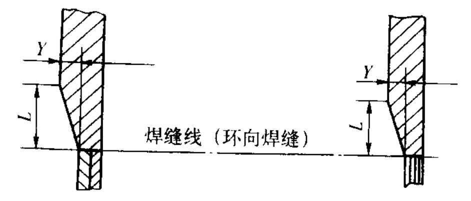


图 6.7-18　不等厚多层圆筒间对接过渡段结构

(4) 单层半球形封头与多层圆筒间对接接头设计

当单层半球形封头的壁厚小于多层圆筒的壁厚时，可按图 6.7-19a、b、c、d 形式设计，这时应将多层筒节端部减薄；当半球形封头的壁厚大于多层圆筒壁厚时，可用图 6.7-19e、f 形式，在多层筒节的外层作阶梯式加厚。

单层椭圆形封头、准球形封头或锥形封头与多层圆筒间连接，亦可参照图 6.7-19 结构形式设计。

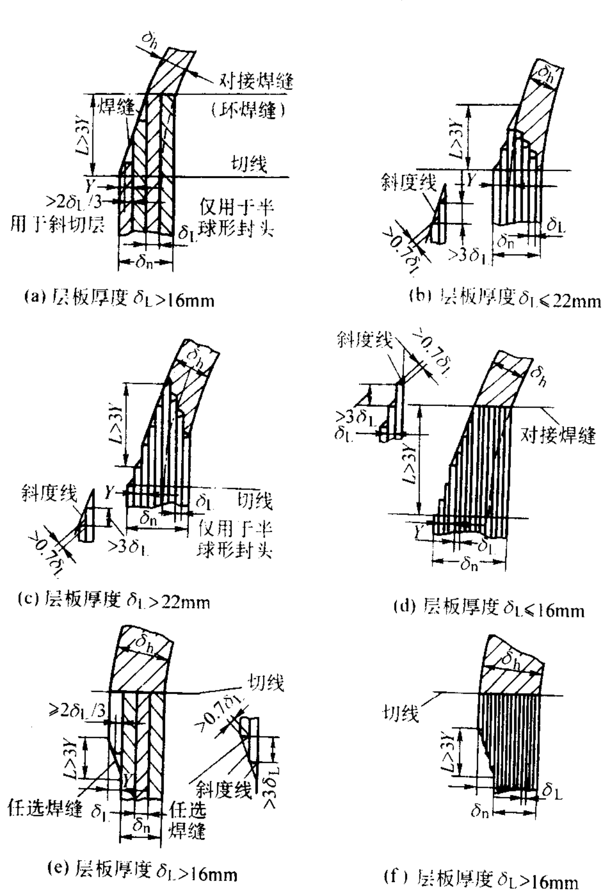


图 6.7-19　单层半球形封头与多层圆筒间对接接头设计

(5) 多层半球形封头与多层圆筒间对接接头设计

这类对接接头应采用双面焊或单面焊全焊透的对接焊缝，接头处可按图 6.7-20a 的形式作阶梯式过渡；多层锥形封头与多层圆筒间的连接可按图 6.7-20b 的结构形式过渡。

5.3　平封头与筒体的焊接接头设计

平封头受力状态比球形或近球形封头复杂，既有强度要求又有刚度要求。只有当生产工艺有要求或受结构限制时才采用。这时，应重视它与筒体间连接结构的设计。

若采用角接头或 T 形接头，则焊缝处于应力复杂区（有附加弯曲应力等），应使用全焊透的焊缝，并尽可能双面焊。必要时，可改变局部构造使之变成对接接头。图 6.7-21 的接头形式可供选用，图 6.7-21h 为对接接头。

图 6.7-22 为平封头与多层容器筒体的连接结构形式，都要采用对接接头。也适用于管板与多层筒体的连接。

5.4　接管、凸缘、法兰与壳体的焊接接头设计

开孔削弱了壳体的强度，又破坏了结构的连续性；接管、凸缘、法兰等零件的刚性与壳体不同，而须在其孔边处相连接。因此，工作时将在连接处产生附加应力（主要是弯曲应力），构成了局部高应力区。若采用 T 形接头或角接头连接，则焊缝恰好落在该区上。所以，开孔补强、保证焊缝



内外质量和减少应力集中是这种连接结构设计的重要内容。特别对于承受交变载荷的压力容器、厚壁压力容器、低温压力容器以及高强度钢制压力容器的这类接头的设计和制造更应仔细。

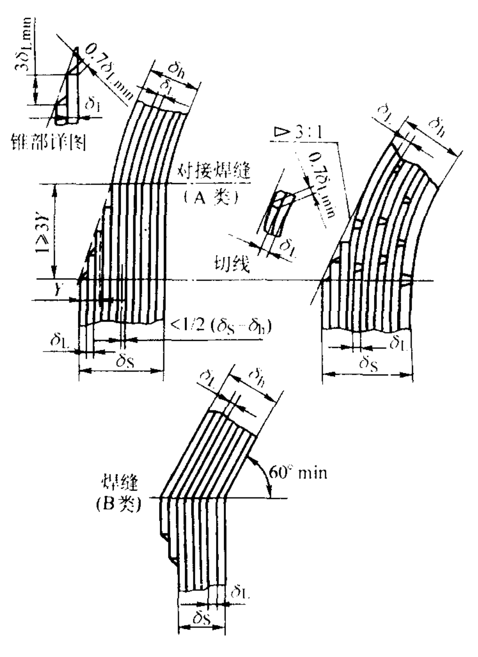


图 6.7-20　多层半球形封头与多层圆筒间对接的过渡结构

5.4.1　接管与壳体

(1) 插入式接管

接管插入到孔内，接管与孔壁之间的间隙应不大于3 mm；在承受疲劳载荷的压力容器、低温压力容器和钢材常温抗拉强度 $\delta_b>540$ MPa 的容器上，接管内径边角处应倒圆，圆角半径一般取管壁厚的1/4或19 mm两者中最小者。

1)　无补强圈的插入式接管

①　局部焊透的T形接头（图6.7-23）。只适用于低压常温容器中，不适用于有急剧温度梯度的场合。图6.7-23a、b适于厚度小于20 mm的薄壁容器，且接管的壁厚小于容器壁厚的1/2。图6.7-23b因是单面焊，根部不可能全焊透，只适用于低压低碳钢制容器。对于壁厚20～50 mm的容器，应采用图6.7-23c、d、e双面开坡口的T形接头。焊脚尺寸 K 起着一定开孔补强作用。

②　全焊透的T形接头。这种接头工作可靠，使用寿命长。高温高压容器、低温压力容器、承受交变载荷的容器以及低合金高强度钢制容器上直径大于100 mm的接管均应采用这种接头，见图6.7-24。若对角焊缝外表面加工成圆角可降低应力集中系数，对提高低周疲劳强度或低温抗脆断能力有利。又因接头全焊透便于作超声波探伤因而能有效地控制焊缝质量。

2) 带补强圈的插入式接管　只适用于钢材的常温抗拉强度 $\delta_b\leqslant540$ MPa、壳体名义厚度 $\delta_n\leqslant38$ mm、补强圈厚度 $\leqslant1.5\delta_n$ 的压力容器上的大直径接管，不适于有急剧温度梯度的场合。补强圈应与壳体紧密贴合且有M10的信号孔。图6.7-25是典型接头形式。

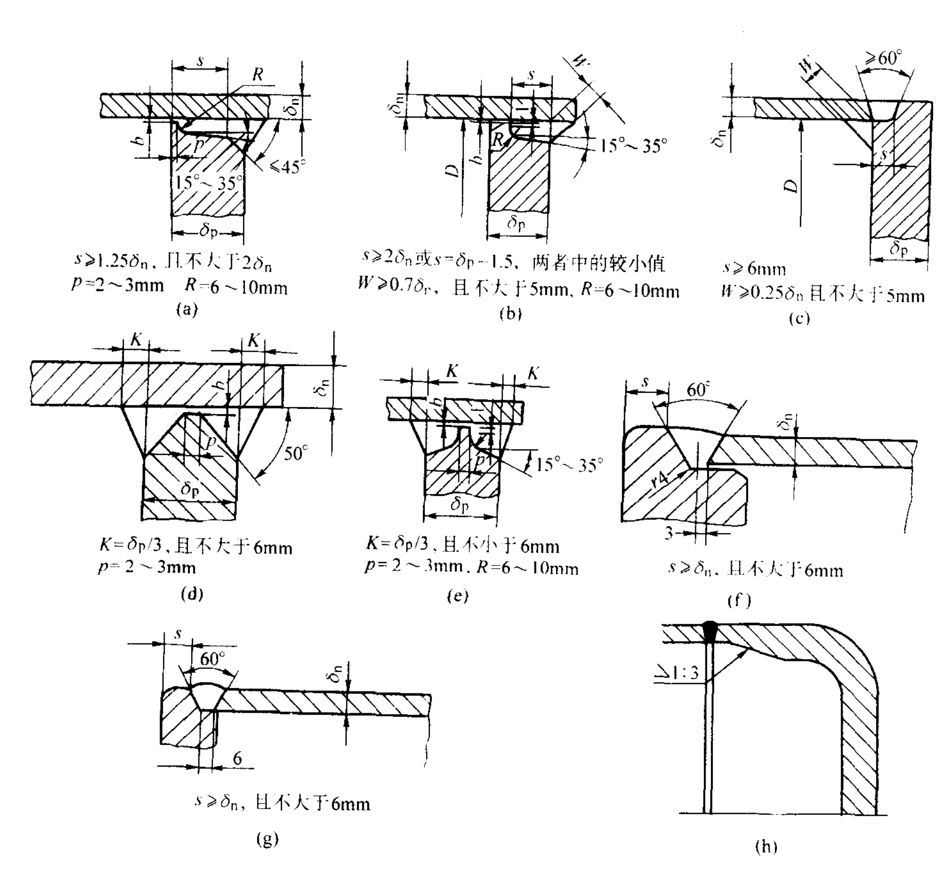


图 6.7-21　平封头与筒体连接结构

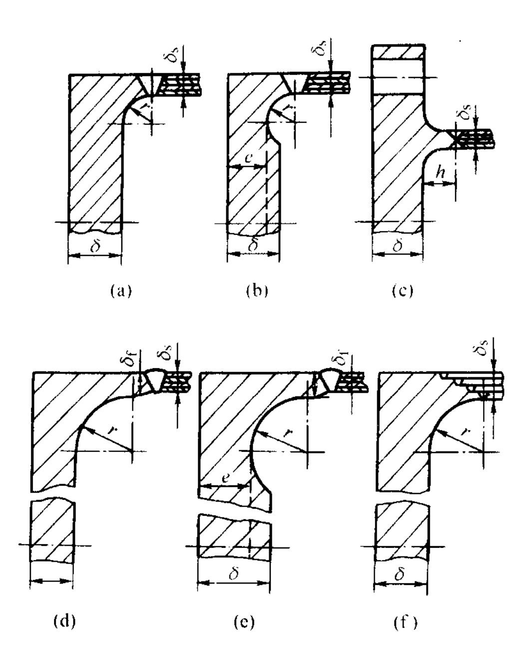


图 6.7-22 平封头与多层容器筒体连接结构

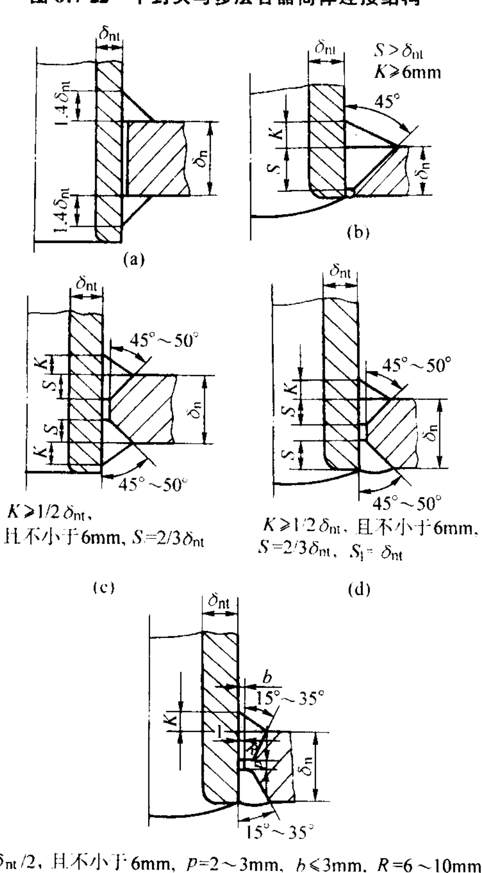


图 6.7-23 接管与壳体连接的局部焊透的焊接接头

(2) 嵌入式接管

把角焊缝改变成对接焊缝的接头设计，见图 6.7-26。接管为锻件，可按补强的需要设计成各种接管形状。图 6.7-26a 一般适用于球形封头或椭圆形封头中心部位的接管与封头的连接，且封头厚度 $\delta_n \leq 50$ mm。

这种接头的最大优点是焊缝避开高应力区，并且便于施焊和探伤。但焊缝较长，焊接工时和焊接材料消耗增加，焊接时拘束度较大，而且锻造接管成本高。

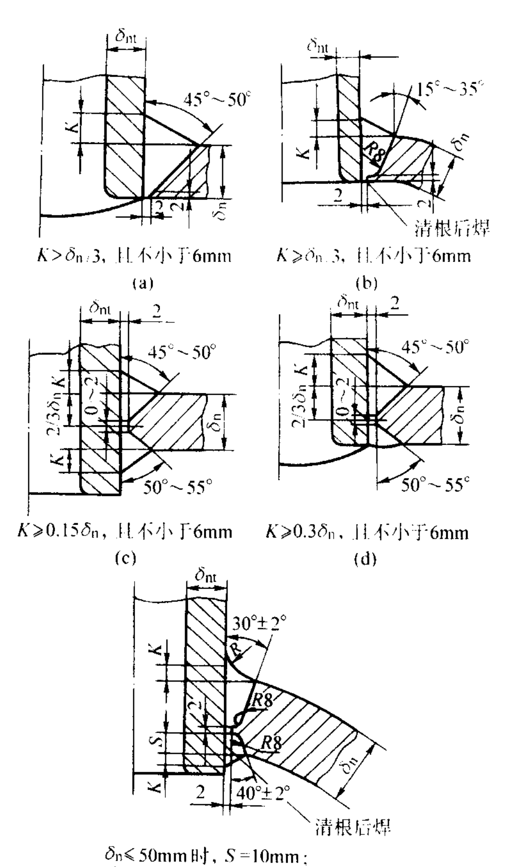
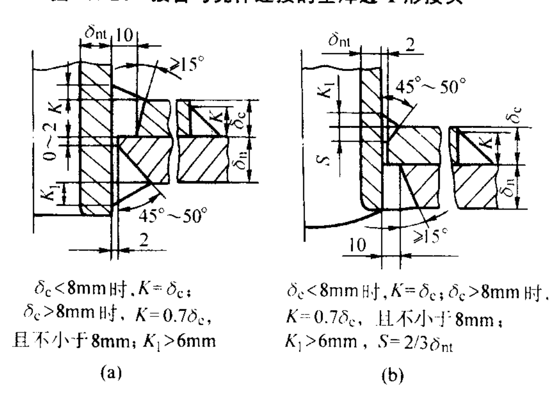


图 6.7-24 接管与壳体连接的全焊透 T 形接头



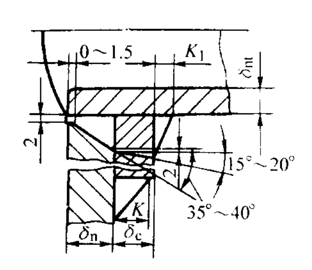


图 6.7-25 带补强圈的 T 形接头

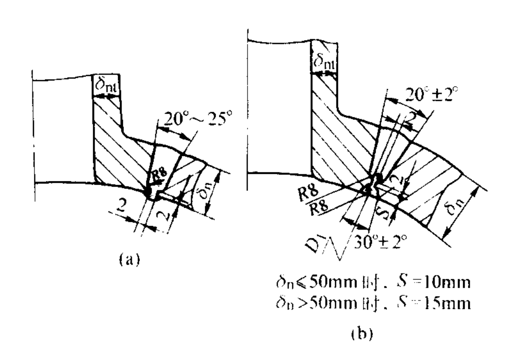


图 6.7-26 嵌入式接管与壳体的接头形式

(3) 安放式接管

接管安置在孔边外侧构成角接头，见图 6.7-27。其优点是角焊缝拘束度低，焊缝截面小。缺点是角焊缝收缩应力垂直于壳体厚度方向，这就要求壳体开孔处的钢板无夹层现象。这类接头适用于中等厚度（30～60 mm）的压力容器。当接管直径与壳体直径之比较小时，采用图 6.7-27a、b 形式，角焊缝焊后镗孔，去除焊缝未焊透的根部，以获得全焊透的优质焊缝；图 6.7-27c 适用于接管内径 ≤100 mm；图 6.7-27d、e 适用于壳体厚度 $\delta_n \leq 16$ mm 的碳钢和碳锰钢，或 $\delta_n \leq 25$ mm 的奥氏体钢制容器。其中图 6.7-27d 的接管内径应不大于 50 mm，壁厚 $\delta_{nt} \leq 6$ mm；图 6.7-27e 的接管内径应大于 50 mm，且不大于 150 mm，壁厚 $\delta_{nt} > 6$ mm。

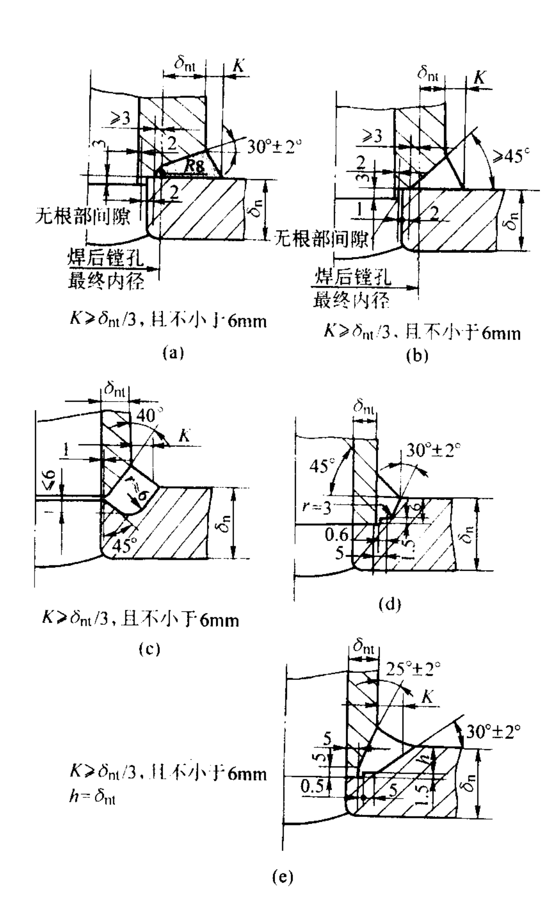


图 6.7-27 安放式接管与壳体的连接接头

(4) 接管与多层壳体

接管与多层筒节或多层封头之间的连接可用图 6.7-28 的全焊透 T 形接头或对接接头。小直径（<50 mm）接管与多层壳体连接可用图 6.7-28j、k 的局部焊透接头形式，但须从内侧焊接。图中圆角半径 r_{1min} 取 $\delta_{nt}/4$ 或 19 mm 中最小者，$r_2 \geq 6$ mm，$r_{3min} = r_{1min}$，$t_c \geq 6$ mm，或不小于 δ_{nt} 和 19 mm 中较小值的 0.7 倍。使用图 6.7-28j、k 的接头形式时，应设法防止外界杂物进入层板与接管外径间的间隙内，但不准用密封焊。

5.4.2 凸缘与壳体

凸缘与壳体的连接和接管与壳体的连接相类似，可采用插入式、安放式或嵌入式结构。

图 6.7-29 属于非焊透的接头形式。使用角焊缝，其焊脚尺寸按传递载荷大小确定，但不得小于 6 mm。这种结构不能用于承受脉动载荷的容器。

图 6.7-30 属于全焊透的接头形式，均需开坡口。图 6.7-30c 适用于壳体厚度 $\delta_n \leq 16$ mm 的碳钢和碳锰钢，或 $\delta_n \leq 25$ mm 的奥氏体钢制容器。

图 6.7-31 是小直径凸缘和接管与壳体连接的各种结构形式。直接与壳体连接的凸缘和接管的公称直径应等于或小于 50 mm。图 6.7-31b、d 适用于壳体厚度 $\delta_n \leq 16$ mm 的碳钢和碳锰钢，或 $\delta_n \leq 25$ mm 的奥氏体钢容器。图 6.7-31a 是在壳体上堆焊凸缘，堆焊层的总厚度应满足螺纹数的要求。

5.4.3 法兰与筒体

(1) 法兰与单层圆筒体连接

法兰环在筒体端部与之垂直相连，采用角接头，见图 6.7-32a、b、c、d 所示接头形式。按容器标准其焊缝属 C 类焊缝。适用于法兰壁厚 $\delta_f \leq 15$ mm、法兰内径 $D_n \leq 300\delta_f$、工作压力 $p \leq 2$ MPa、工作温度 ≤370℃的容器。

对于高温、低温或受变动载荷的容器，宜采用带锥颈法兰，见图 6.7-32e、f。由于法兰环与筒体之间设计一过渡锥颈，大大降低二者因结构突变而造成的局部应力集中，具有较高的抗脆断和抗疲劳强度。

法兰与接管之间的连接接头，也可采用与此相同的接头形式。

(2) 法兰与多层圆筒体连接

无论是单层或多层的法兰与多层圆筒体之间的环向接头均应采用双面焊对接接头或单面焊对接接头，而且要求全焊透，其接头位置可按图 6.7-33 选取。图 6.7-33e、f 堆焊层厚度应不小于螺栓直径的 0.15 倍，且不大于 10 mm。堆焊层应把各层连接在一起。螺栓圆直径应不大于圆筒体直径。

5.5 管板与圆筒体的焊接接头设计

管板与圆筒体的连接形式由换热器的形式决定。固定管板换热器的管板通常直接焊在筒体的两端，结构上和平封头与筒体连接相似。对于承压较高的换热器，应尽量采用全焊透的焊接接头形式。

对于管板与筒体焊后需经热处理的容器或压力较高而又只能进行单面焊接时，可考虑采用短筒节，以保证管板与短筒节之间的焊缝可进行双面焊，提高焊缝质量。

(1) 带法兰的管板

兼作法兰用的管板与筒体端部连接的接头形式可按图 6.7-34 选择。

(2) 不带法兰的管板

图 6.7-35 示出不兼作法兰的管板与圆筒体的各种连接结构。可按承压高低和能否双面施焊等因素选择。

(3) 管板与多层圆筒体的焊接接头

结构形式可参见图 6.7-22。

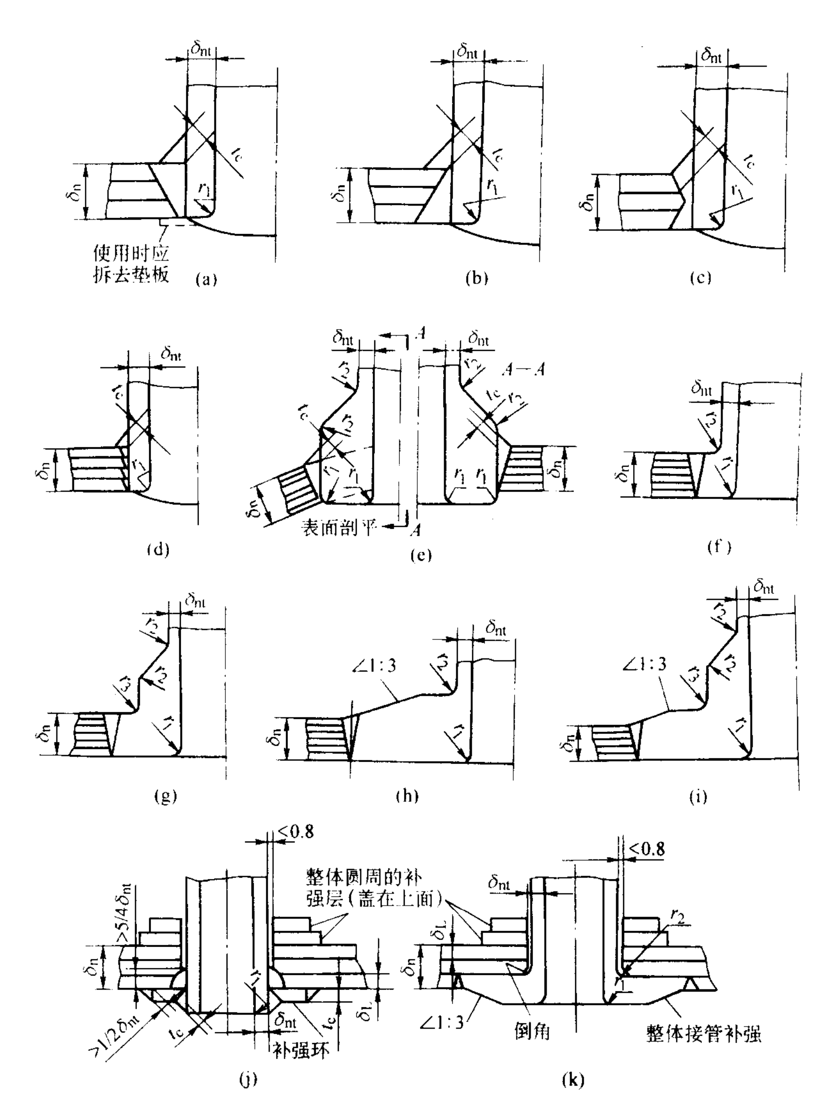


图 6.7-28　接管与多层容器壳体的焊接接头

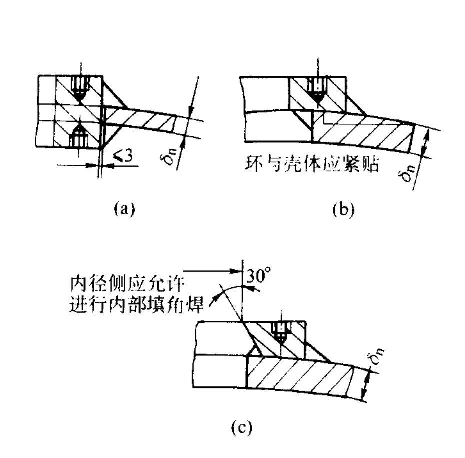


图 6.7-29　凸缘与壳体连接的非焊透接头形式

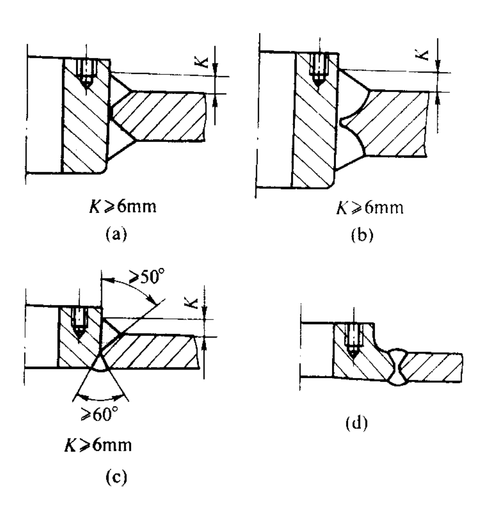


图 6.7-30　凸缘与壳体连接的全焊透接头形式

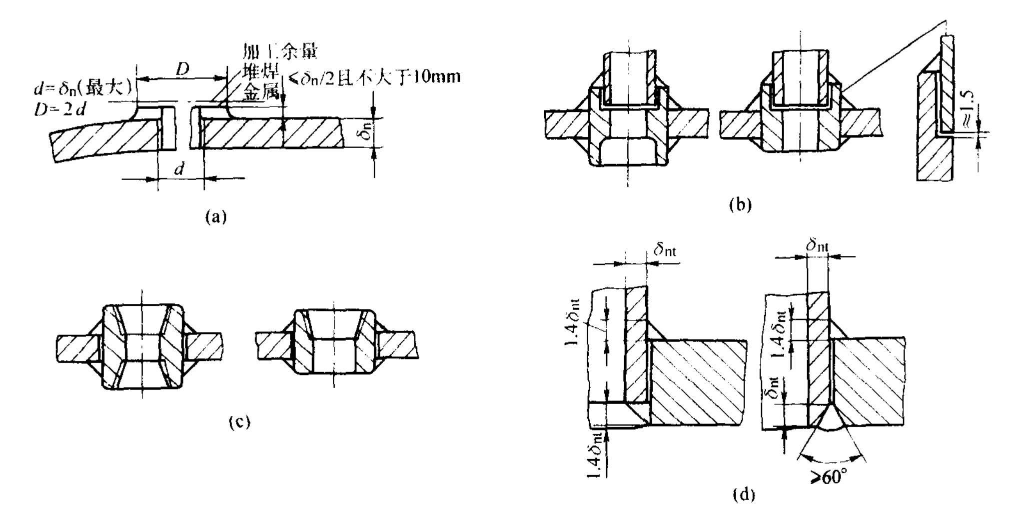


图 6.7-31 小直径凸缘和接管与壳体连接的结构形式

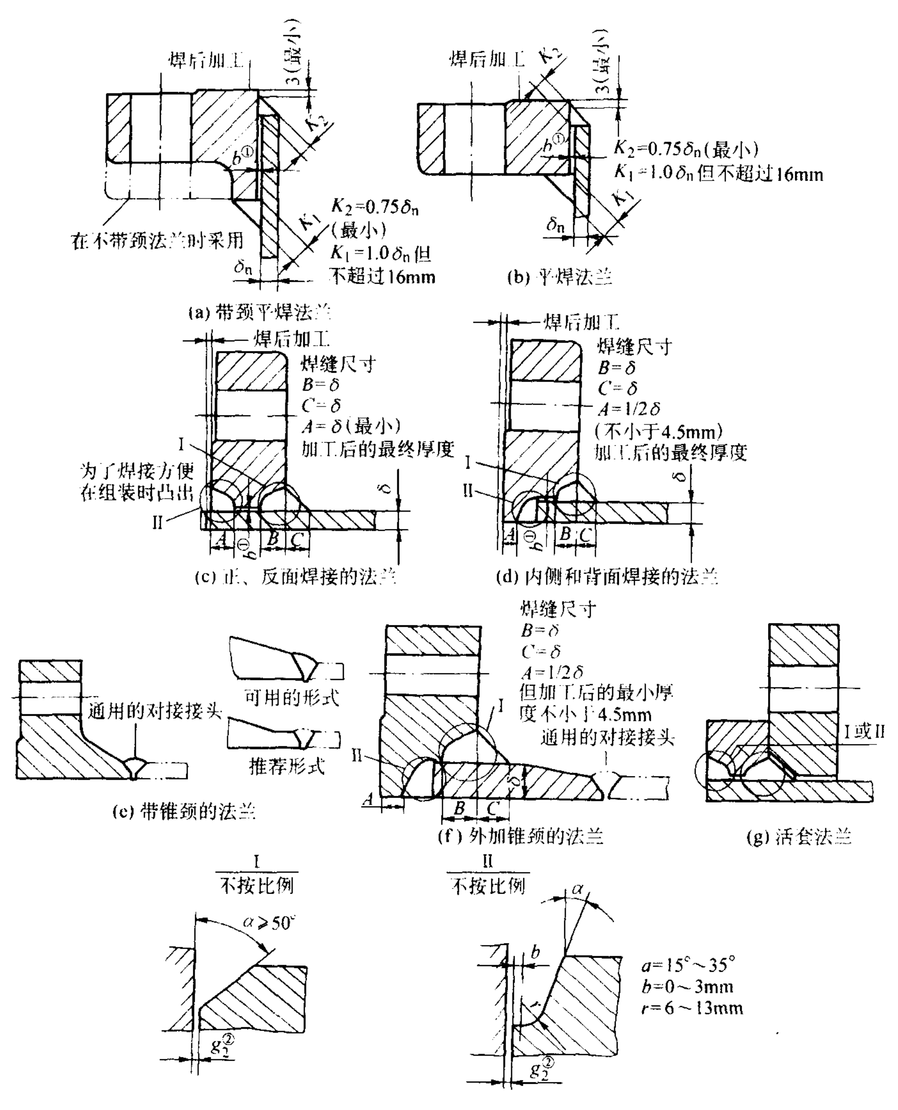


图 6.7-32 法兰与单层圆筒体连接的接头形式

① 法兰内径与圆筒外径间的间隙 b 不得大于 3 mm，径向间隙之和不得大于 4.5。

② g_2 的最大和最小尺寸随所用的焊接工艺（例如焊条种类和尺寸）以及施焊位置而定，g_2 不得大于 3 mm，径向间隙之和不得大于 4.5 mm。



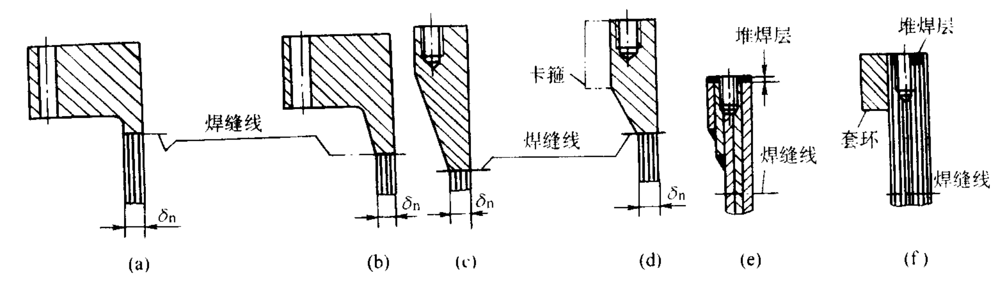
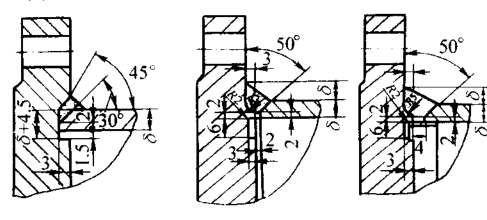


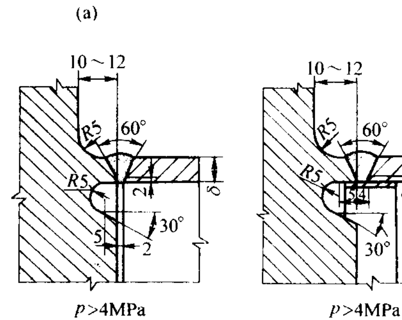
图 6.7-33　法兰与多层圆筒体连接的接头位置



$\delta \geqslant 10$mm、$p \leqslant 1$MPa
不宜用于易燃、易爆、易挥发及有毒介质的场合
(a)

1MPa$<p\leqslant$4MPa
(b)

1MPa$<p\leqslant$4MPa
(c)



$p>$4MPa
(d)

$p>$4MPa
(e)

图 6.7-34　带法兰的管板与筒体连接的焊接接头形式

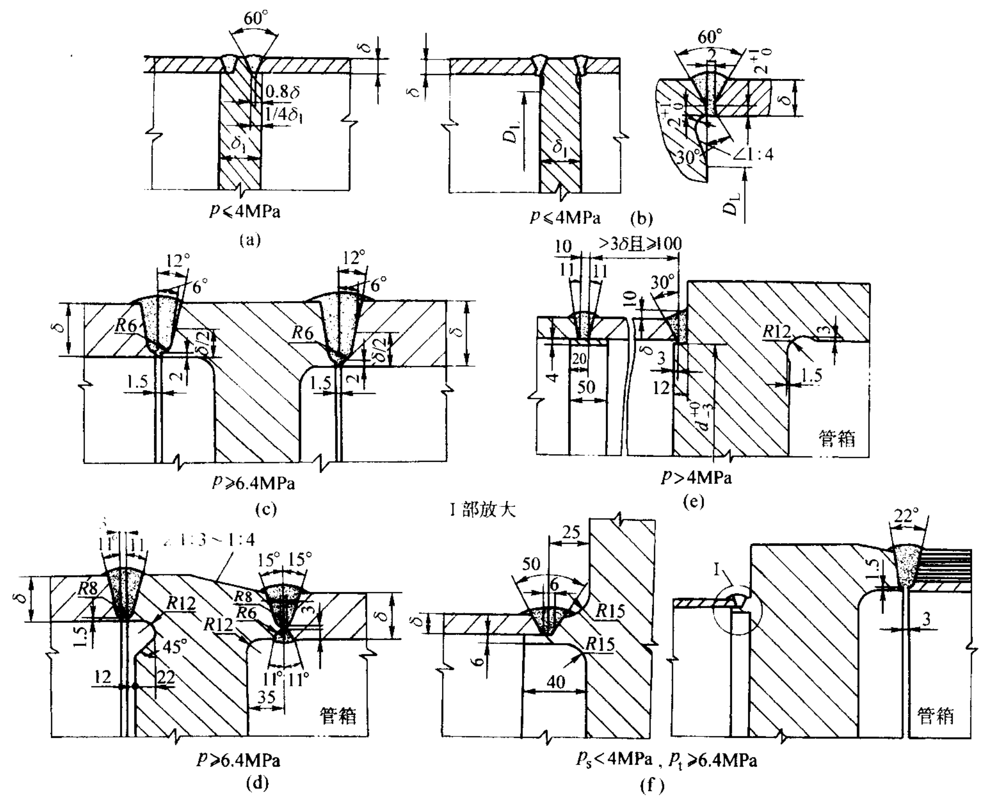


图 6.7-35　不带法兰的管板与圆筒体焊接的各种结构

23

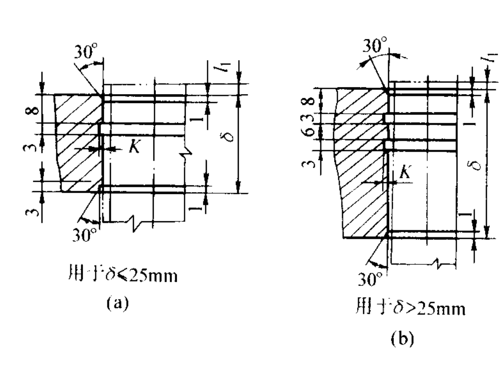


5.6 管子与管板连接的接头设计

管子与管板之间的密封直接影响换热器的质量。密封方法较多，可归纳为胀接法、焊接法和胀焊并用法等，各有相应的结构形式和适用范围。

(1) 胀接法

要求管子和管板之间产生弹性应力，即管子产生塑性变形而管板产生弹性变形。为此，管板材料的屈服极限应高于管材。其连接的结构形式和尺寸可按图6.7-36和表6.7-19确定。胀接适用于设计压力小于4 MPa、设计温度小于300℃、操作中无剧烈振动、无过大的温度变化等情况。



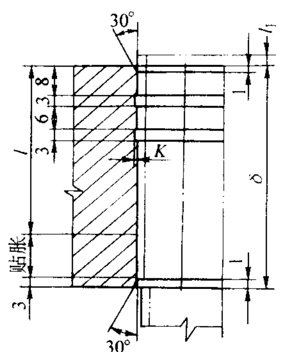


图6.7-36　管子与管板胀接的结构形式

表6.7-19　管子与管板胀接接头尺寸　mm

换热管外径 d	14	19	25	32	38	45	57
伸出长度 l_1	3^{+2}			4^{+2}		5^{+2}	
槽深 K	不开槽	0.5		0.6		0.8	

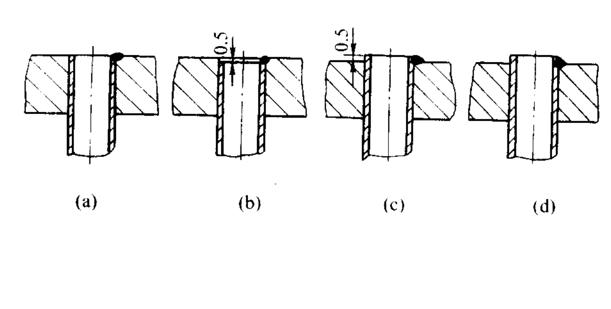
(2) 焊接法

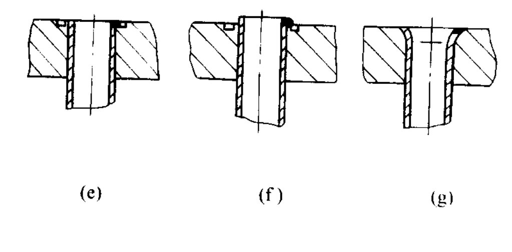
可提高结合强度和密封，适于温度高于300℃或压力高于4 MPa的条件下工作。接头有端部焊接的和内孔焊接的两种基本类型。

1) 端部焊接的接头　这种接头应用最多，常用的形式见图6.7-37。图6.7-37a、b、c、d均为不开槽的接头，其中图6.7-37a、b的焊缝有可能减小管内截面；图6.7-37c的焊缝较圆滑，对管内截面减小不多；图6.7-37d呈角焊缝形式，对管截面没有影响。图6.7-37e、f均为开减应槽的接头，槽深为管壁厚的1.5～2倍。其优点是熔深大，其焊接变形及焊接应力小，焊缝成形美观。其中图e最为常用。图6.7-37i、j的接头形式主要用于焊条电弧焊或填丝气体保护焊。图6.7-37g、h适于先焊后胀的情况，可避免胀管时挤压焊缝。

对图6.7-37d的实际应用，可按图6.7-38和表6.7-20中的规定设计。这种接头适用于公称压力 $p \leq 35$ MPa，但不适用于有较大振动及有间隙腐蚀的场合。

2) 内孔焊接的接头　对于要求高的如在高温高压、强腐蚀性介质以及核反应堆等特殊条件下工作的热交换器，端部焊接的接头形式（图6.7-37）已不适应，应采用内孔焊接的接头形式，见图6.7-39。图6.7-39a、b、c、d属对接接头，焊接比较容易，受力状态好，管内截面和管板孔截面相同，最适于U形管热交换器的管子与管板连接。其中图6.7-39a、b为带锁边的对接接头，装配时便于对中定位；图6.7-39e、f、g、h属于搭接接头，装配时受管子长度公差影响小，易于装配。焊接时，要把搭接量全部熔化掉，焊缝尺寸比较大，受力状态不如对接好，且管板孔与管子内截面不一致。其中图6.7-39e在管板上开槽，焊接较易。图6.7-39g的接头适于电子束焊接。图6.7-39、i、j等接头均在外侧加套圈，焊接时全部熔化，可以调整焊缝的化学成分。





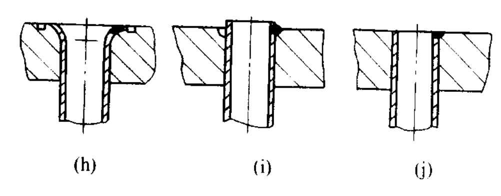


图6.7-37　管子与管板端部焊接的各种接头形式

内孔焊接的方法大多采用高度机械化的非熔化极氩弧焊，尤其是脉冲钨极氩弧焊，在内孔焊接上显示出很大的优越性。

此外，熔化极氩弧焊和电子束焊在内孔焊上都有应用。

(3) 胀焊并用法

焊接可提高结合强度并保证密封；胀接则可消除缝隙，防止产生缝隙腐蚀，并提高焊接接头的抗疲劳性能。因此，适用于密封要求较高、承受振动或交变载荷、有间隙腐蚀或采用复合管板的场合。高温高压和核反应堆用的热交换器采用这种连接形式。

1) 强度胀加密封焊　当温度不太高而压力很高时或介质极易渗漏时采用。连接强度主要由胀接保证，焊接保证密封，接头见图6.7-40。

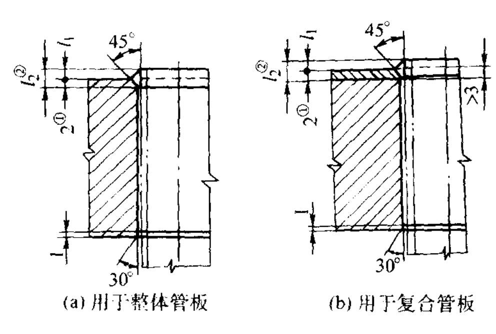


图 6.7-38　管子与管板端部焊接接头形式和尺寸

① 适用于外径大于 14 mm 的换热管，否则应取 1 mm。
② 焊脚高度 l_2 应不小于 1.4 倍的管壁厚度。

表 6.7-20　管子与管板端部焊接接头尺寸　mm

换热管规格 外径×壁厚	10 ×1.5	14 ×2	19 ×2	25 ×2.5	32 ×3	38 ×3	45 ×3	57 ×3.5
伸出长度 l_1	$0.5^{+0.3}_{0}$	$1^{+0.3}_{0}$		$1.5^{+0.3}_{0}$	$2.5^{+0.3}_{0}$			$3^{+0.3}_{0}$

注：1. 当工艺要求管端伸出长度小于表中所列数值时，可适当加大管板焊缝坡口深度，以保证焊脚高 l_2 不小于 1.4 倍管壁厚度。
2. 换热管壁厚与表中所列值不相同时，l_1 值可适当调整。

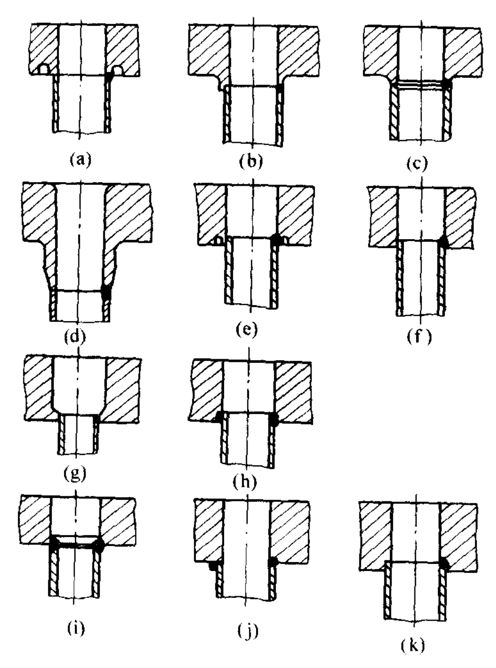


图 6.7-39　管子与管板内孔焊接的各种接头形式

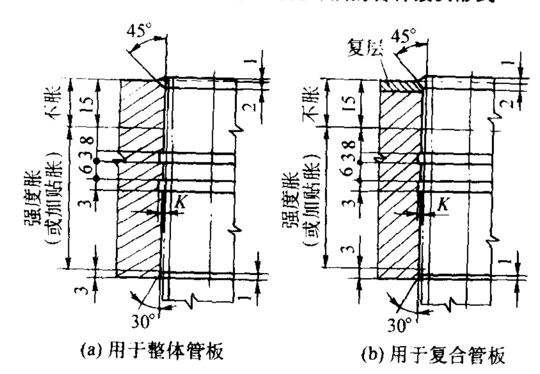


图 6.7-40　管子与管板间强度胀加密封焊接头

2）强度焊加贴胀　采取先焊后胀，使焊缝经受一次较大的塑性变形。缺点是工艺较复杂，焊缝区贴合不如强度胀加密封焊紧密，接头形式见图 6.7-41。

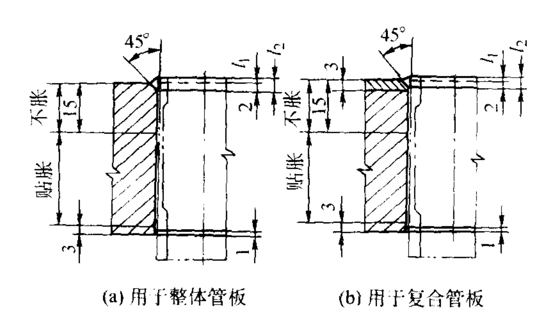


图 6.7-41　管子与管板间强度焊加贴胀接头

（4）爆炸法

利用爆炸方法连接管子和管板是一项新技术，它包括爆炸胀接和爆炸焊接，是利用炸药引爆后的冲击波能量，将管子和管板连接在一起。连接处除有机械连接外还产生冶金结合。这种新工艺正受到国内外重视，有很好发展前景。

6　支座与容器连接的结构设计

压力容器是通过支座固定到某一位置上。按容器形状、安装方式和质量大小使用不同的支座。通常支座直接焊到容器的壳体上，连接处的结构必须安全牢靠，因它向支座传递着容器全部或部分重力（含盛料重力）和由温度变化、振动、风、雪、地震等对容器作用而产生的载荷。

设计时应注意：连接处的支反力是集中作用在容器壳体上，对薄壁容器在该处可能因刚性不足而产生局部变形（如凹陷等），应有加强措施；连接处的接头多为 T 形接头，要按受力性质来设计其结构形式，最好让焊缝不受力或少受力。

6.1　悬挂式支座的焊接结构

6.1.1　耳座

耳式支座结构简单轻便，广泛用于中小型立式容器中。通常是在容器壳体外侧对称地配置 2～4 个，图 6.7-42 示出各种耳座及其与壳体焊接的结构。图 6.7-42a、b 只有立板与壳体用 T 形接头双面角焊缝连接。焊缝传递全部载荷，应焊透而且焊趾向壳体圆滑过渡（图 6.7-43a）。当壁厚超过 100 mm 时，为防止焊缝底部层状撕裂，应按图 6.7-43b 所示，在壳体表面连接部位加工出一定深度的凹槽，并用与壳体材料等强度且塑性良好的焊条预堆焊，堆焊层高度与壳体表面齐平，用砂轮修磨平整后，再将立板与堆焊层相焊。如果材料为合金高强度钢，焊后应对焊缝作表面磁粉探伤检验。图 6.7-42c、d 的水平板（底板）也焊到壳体上，增加了焊缝工作面积，可提高承载能力；图 6.7-42e 是加垫板的耳座，适用于壁薄的容器，增加了局部刚性，防止凹陷。

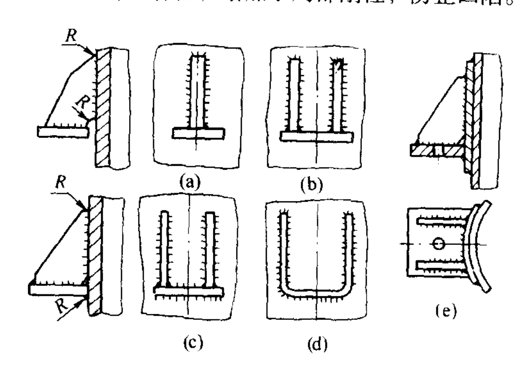


图 6.7-42　耳座及其与壳体焊接结构



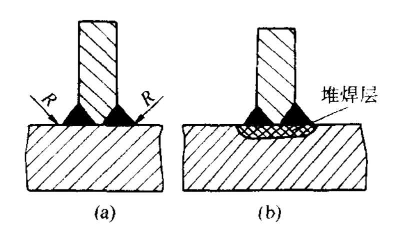


图 6.7-43 承载件与壳体相焊的接头形式

6.1.2 环座

大型薄壁容器或承重较大时采用环座，见图 6.7-44。底板是一圆环直接焊到周壁上，立板均布在底板上兼起肋板作用。图 6.7-44b 为双环式结构，承载能力增加。

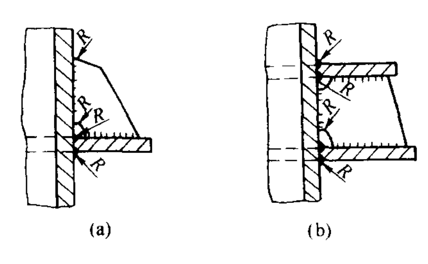


图 6.7-44 环座及其与壳体连接结构

6.2 支承式支座的焊接结构

在容器高度不大且离地面较低的场合常用支承式支座，又称支脚。它直接焊到容器底部。

用型钢制成的支脚最为简单，型钢可以是角钢、槽钢或钢管。适于小型容器，见图 6.7-45。为了提高容器壳体局部刚性，改善力的传递，支脚与壳体间可加垫板，见图 6.7-45b。

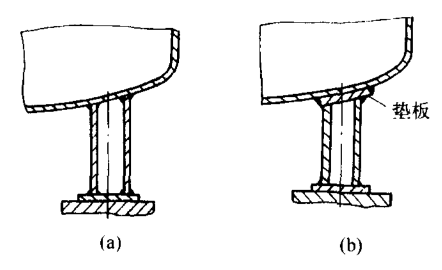


图 6.7-45 支脚（钢管）与壳体连接结构

用钢板焊成的支座承载能力强，被广泛采用，且已标准化（JB 1166—73），图 6.7-46 为常用结构。宜用双面角焊缝与壳体连接，焊脚尺寸约为连接件厚度的 0.7%。对薄壁容器亦可在支座与壳体之间加垫板，连接的角焊缝其焊脚尺寸不小于壳体壁厚。

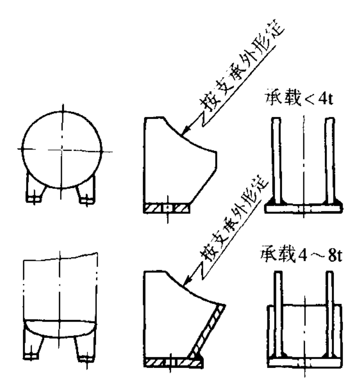


图 6.7-46 钢板焊的支承式支座

6.3 裙式支座的焊接结构

比较高大的立式容器，如塔器等，常用圆筒形或圆锥形的裙式支座（简称裙座）。它与壳体间的连接有搭接和对接两种结构，见图 6.7-47。

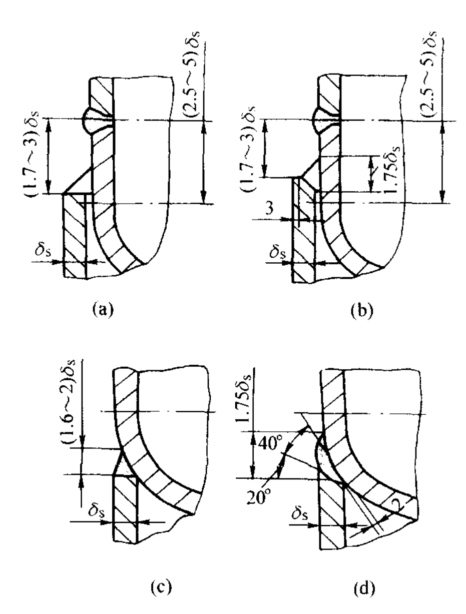


图 6.7-47 裙座与塔体的连接结构

搭接结构要求裙座内径稍大于壳体外径，以便裙座搭焊在底封头的直边上。直边应足够长，一般要求大于（1.7～3）δ_s，避免封头与筒节连接的环焊缝和裙座与封头连接的环焊缝相距太近。搭接接头角焊缝受剪，承载能力较弱，但封头的受力情况较好。裙座壁厚较小时，用图 6.7-47a 结构；壁厚较大时用图 6.7-47b 结构。

对接结构要求裙座与壳体直径相等，二者对齐焊接。焊缝受压，受力合理，因而可承受较大的轴向载荷，适用于大型塔器。但因焊缝落在底封头的球面上，封头受力情况较差。裙座壁厚较小时，可采用图 6.7-47c 结构；壁厚较大时用图 6.7-47d 结构。

对于壁厚超过 50 mm 或容器长度和直径之比大于 18 时，裙座与壳体连接处应加强。如采用凸型堆焊焊缝或锻环式裙座结构，见图 6.7-48。

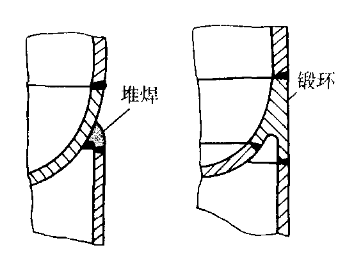


图 6.7-48 堆焊和锻环式裙座的连接结构

我国 560 t 锻焊结构热壁加氢裂化反应器采用了锻环式裙座结构，见图 6.7-49。锻环与裙座用相同材料对接焊，保证了焊接质量有利于焊缝的无损探伤。

6.4 鞍式支座的焊接结构

卧式容器广泛应用鞍式支座（简称鞍座）支承，且已标准化（JB1167—73）。图 6.7-50 为几种常用结构形式。与壳体连接处有加垫板和不加垫板两种，垫板作用主要是改善壳体局部受力情况。

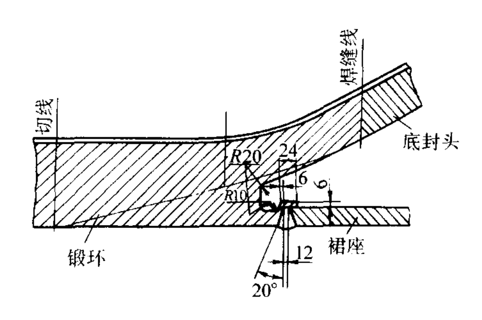


图 6.7-49　560 t 加氢反应器裙座与壳体的连接结构

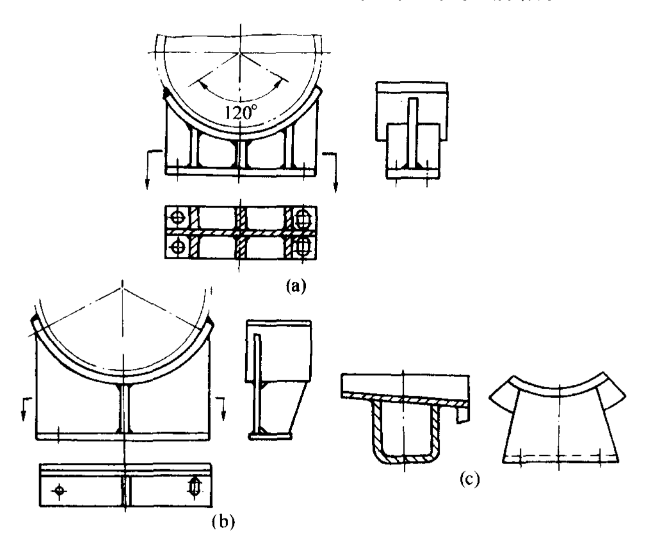


图 6.7-50　鞍座的结构形式

鞍座与壳体连接的角焊缝受力很小，故焊脚尺寸不宜过大，但要注意焊缝质量，应无裂纹和咬边等引起应力集中的缺陷，焊缝向壳体应圆滑过渡。这点对槽车上的鞍座尤为重要。

6.5　柱式支承的焊接结构

柱式支承是指球罐支承结构中较为常用的一类。其中又以赤道正切柱式支承结构应用最为普遍，图 6.7-51 为其支柱与球壳连接的结构。图中的柱体为圆筒形结构，可用无缝钢管或钢板卷焊制成。支柱与赤道正切，正切的位置有：与球壳外径的赤道圆正切、与球壳内径的赤道圆正切和与小于球壳内径的赤道圆正切三种形式。其中与球壳内径赤道圆正切时，附加弯矩最小，较为合理。

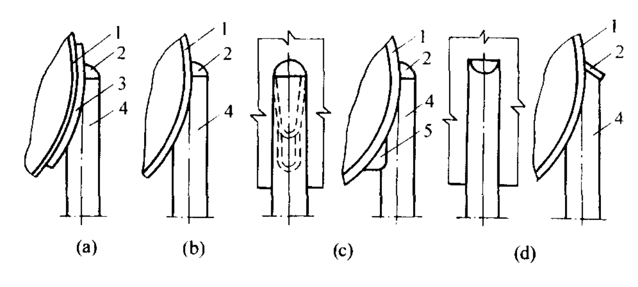


图 6.7-51　支柱与球壳体连接的结构

1—球瓣；2—柱封头；3—加强板；4—支柱；5—托板

图 6.7-51a 是有加强板的支柱，可改善球壳的局部应力，增加球瓣的局部刚性，适用于薄壁球罐。缺点是增加了搭接焊缝，焊接区残余应力较高，焊缝质量不易检验。特别是当球壳采用低合金高强度钢时，在加强板与球壳焊接过程中易产生裂纹。因此，此结构应慎重采用。

图 6.7-51b 是无加强板结构，结构简单，焊接质量较易控制，施工方便，被广泛采用。为了改善支柱与球壳连接处受力过于集中的问题，可在连接处下部设置托板，见图 6.7-51c。为防止雨水流入，支柱上端应密封，可用半球形封头或平封头（图 6.7-51d），前者外形美观。图 6.7-52 和图 6.7-53 分别介绍国外球形容器和椭球形容器与支承连接的结构。

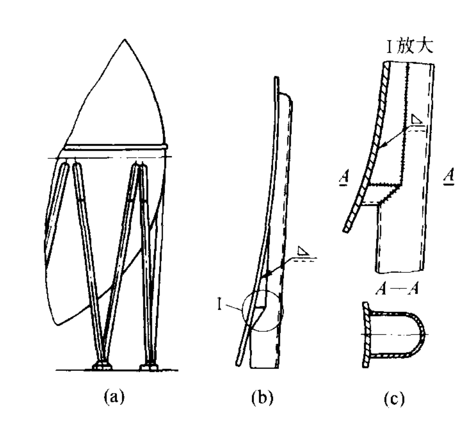


图 6.7-52　球形容器与 V 形柱式支承的连接结构

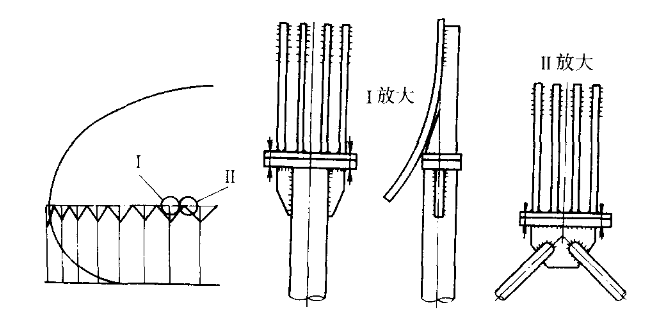


图 6.7-53　椭球形容器与柱式支承的连接结构

6.6　多层容器与支座的连接结构

支承的方式与单层容器壳体基本相同。同样，在必要时，可在多层筒节或封头外层加设支承板或支承环，见图 6.7-54。对非半球形封头应特别注意不连续应力的作用。

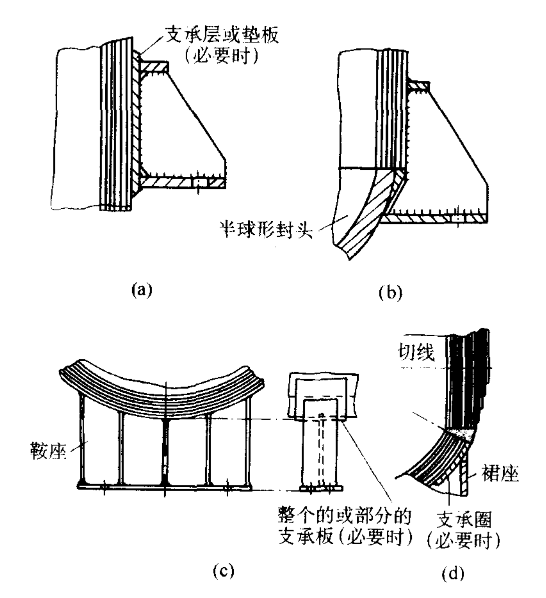


图 6.7-54　多层容器壳体与支座的连接结构

编写：陈祝年（山东大学）

第 8 章　薄壁焊接结构

1　概述

薄壁焊接结构是指由薄壁的板、壳或杆组焊而成的金属结构。这类结构的共同特点是壁厚远小于其周边的几何尺寸。由于组成结构的元件壁薄，其成形加工较容易，因而可以根据强度、刚度和稳定性的要求按最合理受力情况和最佳的材料配置来设计结构的形状和尺寸，使材料的性能获得最大的发挥和利用。所以质量轻和节省金属是这类结构的最大优点。

正因为薄壁焊接结构具有这两大优点，所以在运载工具中获得广泛采用，如汽车车体、铁路机车和客车车体、船体、火箭壳体、集装箱等；此外，大型存储容器中的球罐和立式柱形储罐、水工金属结构中的闸门、大型公路金属桥梁以及大型建筑物中的轻钢结构等也都获得采用。

薄壁结构在使用中同样有强度、刚度和稳定性问题，而且比厚壁结构要复杂得多，往往需用弹性力学理论来解决。此外，还有耐腐蚀问题，因为在同样腐蚀介质环境下，薄壁相对于厚壁更经不起腐蚀。比较而言，这些问题中以稳定性问题最为突出。极容易因整体或局部失稳而失效，从而给结构设计和制造带来较大困难。本章重点介绍提高薄板、薄壳和薄壁杆强度、刚度和稳定性方面的合理结构形式，以及在设计中应注意的问题。

1.1　薄板及其工作特点

板厚不超过板面最小尺寸 1/5 的板称为薄板，否则为厚板。平分板厚的面称中面，当中面为平面时称为板，中面为曲面时称为壳。

解决薄板的强度、刚度和稳定问题，必须分清板的受载情况、板周边的几何形状及其支承条件。当外力是作用于中面内的面内载荷时，则属于弹性力学的平面应力问题，其应力和应变沿板厚不变；当外力是垂直作用于中面的横向载荷时，则属板的弯曲问题，这时薄板中面将产生弯曲、扭转及面内的拉伸（压缩）或剪切变形；当面内载荷及横向载荷共同作用时，若中面挠度较大，应考虑板的弯曲问题；若中面受压应力，应考虑板的稳定问题。

受横向载荷作用的薄板，其截面上产生的内应力极为复杂，既有弯曲内力也有薄膜内力，而且其大小与中面挠度变形程度有关。当中面挠度 ω 远小于板厚 t 的 1/5 时，板内的薄膜内力远小于弯曲内力而忽略不计。这种板称为刚性板，属于薄板小挠度问题；当中面挠度较大（$1/5<\omega/t<5$）时，弯曲内力和薄膜内力具有同一数量级，都不能忽略，这种板称柔性板属于大挠度问题；当中面挠度很大（$\omega/t\geqslant5$）时，弯曲内力远小于薄膜内力而可忽略，载荷主要由薄膜内力平衡。这种板称绝对柔性板，属弹性薄膜问题。

在工程实际中经常遇到的是小挠度薄板，这里主要介绍这类板的强度、刚度和稳定性。

1.1.1　受横向载荷的板

以最常遇到的矩形薄板为例。在周边简支情况下受到均布载荷时（见图 6.8-1），板将发生弯曲。板中点的应力和挠度最大，可用以下两式表达

$$\sigma_{max}=fq\left(\frac{b}{t}\right)^2 \tag{6.8-1}$$

$$\omega_{max}=k\frac{qb^4}{Et^3} \tag{6.8-2}$$

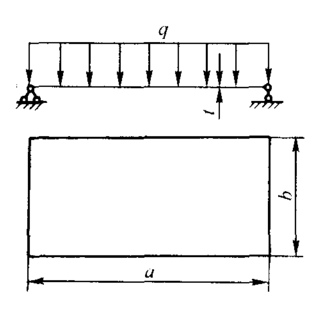


图 6.8-1　周边简支的矩形薄板受均布连续横向载荷

式中，σ_{max} 为矩形板中心的最大正应力；ω_{max} 为矩形板中心的最大挠度；q 为均布载荷；b 为矩形板（短边）宽度；t 为矩形板厚度；E 为材料的弹性模量；f、k 为均与 $\frac{a}{b}$ 比值有关系数。

从以上两式看出，要提高该矩形薄板的强度和刚度可以采取以下措施。

① 选用弹性模量 E 高的材料。由于钢材的弹性模量相差不大，故其选择余地有限。

② 减小板宽 b 或增加板厚 t，以减少宽厚比（$\frac{b}{t}$）。很有效，也是最常用的结构措施。

③ 调整 $\frac{a}{b}$ 比值，以改变 f、k 两个系数。

如果把长方形薄板改成正方形薄板，其 f 和 k 变小，即能提高其强度和刚度。

如果把上述矩形板的周边支承从简支改为固支，则在同样 $\frac{a}{b}$ 比值下，周边固支的板其应力水平一般都比简支的板大，其挠度反而小，最大应力在固定长边的中点。说明了板的边界条件对板的应力和变形有较大影响。

如果把上述矩形薄板改成圆形的或其他形状的薄板，其最大应力和变形的表达式也一样，区别都在 f、k 取值不同。因此，提高其强度和刚度的措施，原则上与矩形板相同。

如果矩形薄板上作用的是集中横向载荷，则最大应力和变形与载荷作用位置有关。若作用在板中央，其表达式为

$$\sigma_{max}=f\frac{P}{t^2} \tag{6.8-3}$$

$$\omega_{max}=k\frac{Pb^2}{Et^3} \tag{6.8-4}$$

式中，P 为集中载荷；f、k 为均与 $\frac{a}{b}$ 和边界条件等有关的系数。

与均布载荷相比较，虽然应力与变形的表达式不完全一样，但对提高薄板的强度和刚度的措施，原则上是一致的，即增加板厚、减小幅面尺寸或改变边界条件等。

1.1.2　受面内载荷的板

也以矩形薄板为例，在周边简支情况下，当中面受到面内单向均布压力（见图 6.8-2）时，需考虑失稳（屈曲）问题。其失稳时的临界应力由下式确定

$$\sigma_{cr}=k\frac{\pi^2E}{12(1-\mu^2)}\left(\frac{t}{b}\right)^2 \tag{6.8-5}$$

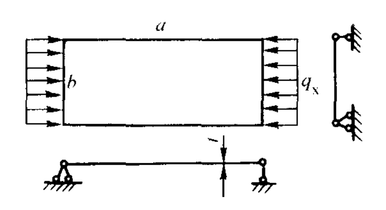
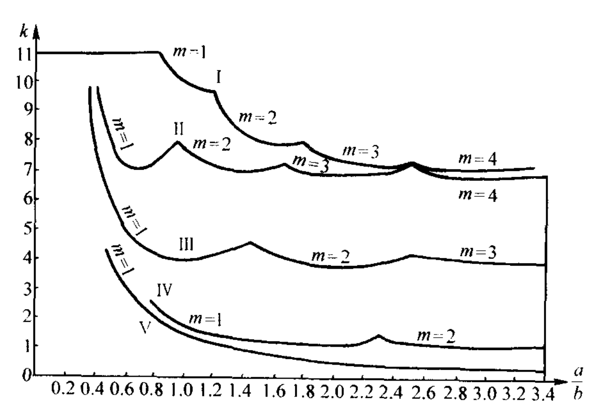


图 6.8-2　矩形薄板受面内均布压力

式中，σ_{cr}为矩形薄板失稳临界应力；E 为板材的弹性模量；μ 为板材的泊松比；t 为板厚；b 为矩形板短边宽度；k 为稳定系数，它取决于$\frac{a}{b}$、μ、m（纵向波数）、边界条件和载荷情况，见图 6.8-3 的曲线关系。



曲线 I—四边固定板；II—两边简支，两边固定；
III—四边简支板；IV—两边简支，一边自由，一边固定；
V—三边简支，一边自由

图 6.8-3　稳定系数 k 与板的长宽比$\frac{a}{b}$的关系曲线

上式只适用于失稳临界应力 σ_{cr} 小于材料的比例极限 σ_p 的情况。

从式（6.8-5）中看出，在面内压力作用下要提高薄板的稳定性，必须提高它的 σ_{cr} 值。可采用以下措施。

① 选用弹性模量 E 高的材料。

② 增加板厚 t 或减小板宽 b，以增加$\frac{t}{b}$比值。其中减小板宽 b 是最适宜的方法。

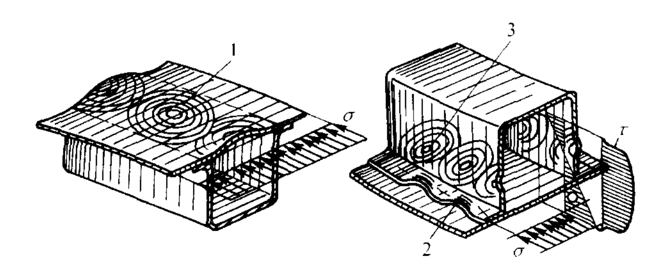
③ 提高稳定系数 k。

从图 6.8-3 看出，以改变矩形板的边界条件和改变矩形板的长宽比$\frac{a}{b}$，对提高稳定系数 k 最为有效。在常见的边界条件中，以周边固定的稳定系数较高而不易失稳，其次是周边简支的，最不利的是三边简支一边自由。有自由边者则易失稳；比较而言，方形板（$\frac{a}{b}=1$）不易失稳，随着板变长或变窄稳定系数将减少而易失稳。

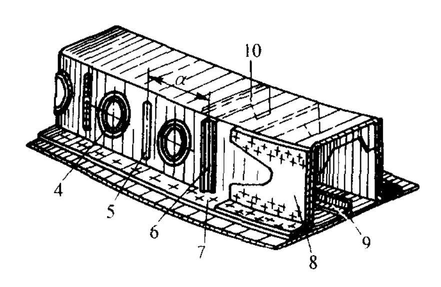
上述是最简单的受载形式，实际的薄壁结构面内可能受到双向压力或拉压力并存，而且不一定均布，或者周边还受剪等；板的形状也可能是圆形、椭圆形或其他形状。它们失稳的临界应力都具有与式（6.8-5）相类似的表达式（一般在工程力学手册能查到），都是通过不同的稳定系数 k 去反映它们之间的差别。

在结构设计中主要是通过控制平板的宽厚比（$\frac{b}{t}$）来防止薄板失稳的。当钢材选定，其比例极限 σ_p 已知，令 $\sigma_{cr}\leqslant\sigma_p$，从式（6.8-5）即可求出板不失稳的宽厚比（$\frac{b}{t}$）的关系。当实际结构不能满足这个关系，则必须改变结构设计。如适当增加板厚或减小板宽。减小板宽的常用方法是在板上设置加劲肋，把板宽分隔成两等分或更多等分，直到符合要求为止。

图 6.8-4 是一个典型的薄板组成的构件，图 6.8-4a 和 b 是在所示应力作用下失稳的情况。图 6.8-4c 是防止失稳的可能措施：其中 3、4、5 都是利用加劲肋来减小板宽的；在板上冲压凸筋或凹槽也起加劲肋作用；7 是增加板厚；1 是翻边孔，它既补偿了因开孔而被削弱板的刚性，也起到防止失稳的加劲作用；6 是利用增加焊点来缩小点距，以防止该处失稳。



(a) 不同应力作用下的失稳(一)　(b) 不同应力作用下的失稳(二)



(c) 防止失稳的可能措施

图 6.8-4　薄壁构件失稳及防止的可能措施

1—外缘板失稳；2—两焊点之间失稳；3—腹板失稳；
4—翻边孔；5—设加劲槽；6—腹板上设加劲肋；
7—增加焊点；8—加衬板；9—加纵向加劲肋；
10—内部加横向加劲肋

1.2　薄壳及其工作特点

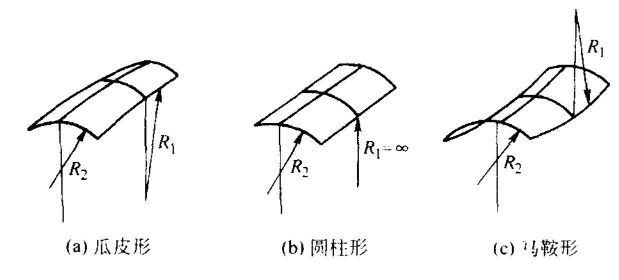
中面为曲面的板称为壳，当壳的厚度 t 远小于各个边界尺寸或远小于中面的最小曲率半径 R [即 $(\frac{t}{R})_{max}\leqslant\frac{1}{20}$] 时，称为薄壳。

薄壳的最大优点是工作时应力状态好，充分利用材料的抗拉强度或抗压强度，有时也利用其抗剪强度。例如，受均布内压时，像皮球一样存在的是双向薄膜拉应力，且沿厚度均匀分布；受均布外压时，就是一个双向都起作用的拱，具有较高的承载能力，其刚性和稳定性都很强。与平板结构相比，在同样承载条件下薄壳所需材料最少。因此，在大型金属结构中被广泛采用。如在机械工程中的水箱（塔）、储油罐、球罐、汽包等各类容器、凸形封头、大型输送管道和机器壳体等；在运载工具中的火箭筒、船舶壳体、轿车壳体等；在水利水电工程中的蜗壳、弧形闸门的面板等都是薄壳结构。

但是，这类结构的设计与计算比薄板结构更为复杂和困难。要解决好薄壳的强度、刚度和稳定性的问题，必须熟悉薄壳的几何特性及其工作特点。否则无法发挥这类结构的优势。

壳体的几何形状有图 6.8-5 所示的三种基本类型，它们

可以用中面上两条正交的主曲率曲线来描述。图中曲率半径为 R_1 的曲线是最大的主曲率线；另一与之垂直的曲率半径为 R_2 的曲线是最小的主曲率线。



(a) 瓜皮形　(b) 圆柱形　(c) 马鞍形

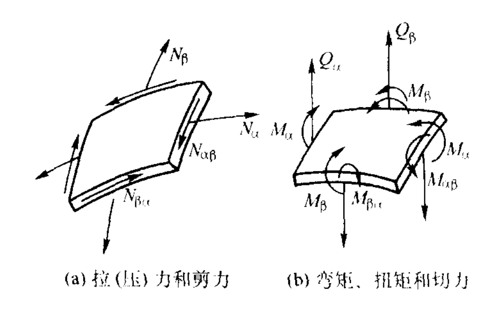
图 6.8-5　壳体的基本形状

图 6.8-5a 是瓜皮形壳体，壳体上每一点各个方向都是凸形（或凹形）的，一般 $R_1 \neq R_2$，但正负同号。若 $R_1 = R_2$，则是特例，为球壳；图 6.8-5b 是圆柱形壳体，壳体上有一个主曲率为零（$R_1 = \infty$），即有一个主方向是直线、另一个与之垂直的主方向为曲线；图 6.8-5c 是马鞍形壳体，壳体上每一个点在一个主方向是凸形的，而在另一个主方向是凹形的。R_1 和 R_2 正负异号。

壳体受外力作用，在其微小单元上产生的内力可分为如下两类。

① 薄膜内力　作用于中面内使薄壳伸长或缩短的内力，如图 6.8-6a 所示的 N_α、N_β 和 $N_{\alpha\beta} = N_{\beta\alpha}$。

② 弯曲内力　使薄壳弯曲或挠曲的力，包括弯矩、切力和扭矩等，如图 6.8-6b 所示的 M_α、M_β、$M_{\alpha\beta} = M_{\beta\alpha}$、$Q_\alpha$、$Q_\beta$。



(a) 拉(压)力和剪力　(b) 弯矩、扭矩和切力

图 6.8-6　薄壳的内力

当薄壳承受均布外力，壳的厚度及曲率无突然变化，没有产生弯矩的边界（如与其他部位相连结）时，可以忽略弯矩、切力和扭矩的影响，仅用静力平衡方程即可求出内力，这就是薄膜理论或无弯矩理论。这时薄壳内仅存内力所对应的应力称为薄膜应力，沿壳厚度均匀分布。实际上，由于薄壳厚度很小，与壳内的拉伸压缩相比，抗弯刚度较小，占主要地位的是薄膜应力状态，弯曲应力只是从属地位。只有在壳体的边界附近、厚度或曲率有突变的部位，弯曲应力状态才显出其重要性。近似的作法是在这些边界部位考虑弯矩、切力和扭矩的影响，而在远离处仍应用薄膜理论计算其应力。此法称“边缘效应”法。

1.2.1　薄壳的强度和刚度

薄壳承载后引起的应力和变形与薄壳的结构形状、几何尺寸及受载情况等因素有关。这里以最常遇到的球壳和圆柱壳受均布内压力为例，说明提高这两种壳体强度和刚度的基本措施。表 6.8-1 列出了它们的应力和位移计算公式。

表 6.8-1　典型薄壳的应力和位移计算公式

结构与受力简图		应力与位移公式	备　注
球形薄壳	（图：δ_z、δ_t、p、R、t）	$\sigma_t = \sigma_z = \dfrac{pR}{2t}$　(6.8-6) $\omega = \dfrac{pR^2}{2Et}(1-\mu)$　(6.8-7)	σ_t 为切向（环向）应力，MPa σ_z 为径向应力，MPa ω 为壳体中面法向位移，mm p 为均布内压力，MPa R 为球壳或圆柱壳半径，mm t 为壳的厚度，mm E 为壳体材料的弹性模量，MPa μ 为壳体材料的泊松比
圆柱形薄壳	（图：δ_t、δ_z、$2R$、p、t）	$\sigma_z = \dfrac{pR}{2t}$　(6.8-8) $\sigma_t = \dfrac{pR}{t}$　(6.8-9) $\omega = \dfrac{pR^2}{Et}(1-\dfrac{\mu}{2})$　(6.8-10)	

从表 6.8-1 中所列两种典型的薄壳看出，它们共同点是受均布内压力作用下，壳体的应力与所施内压力 p 及球壳或圆柱壳半径 R 成正比，而与壳体厚度 t 成反比。如果壳体材料和工作压力已确定，则壳体的强度决定于 t/R 比值。增加壳体厚度或减小半径都有利于提高其强度。或者说，若想增加壳体的容积（既增加 R），就必须同时增加壳体的厚度，否则强度不足；从表 6.8-1 中位移公式看出，对于工作压力一定的条件下，这两种壳体的变形均与半径 R 平方成正比，而与材料的弹性模量 E 及壳体厚度 t 成反比。因此，要提高壳体的刚度，一是选用弹性模量 E 大的材料和增加壳体厚度 t，二是控制半径 R。同样壁厚的管道，管径越小其刚性就越大。



球壳与圆柱壳的区别是壳体上的应力状态不同，前者切向应力和径向应力相等，后者切向应力比径向应力大一倍。说明了材料、内压和半径相同情况下，圆柱形壳体的厚度要比球壳体大一倍。若用于制作容器，显然球形容器受力比圆柱形容器合理，用材最省；从位移角度看，材质、内压和半径都相同情况下，也是球壳比圆柱壳小。但是，球壳的拼装焊接比圆柱壳困难，制造成本较高。

1.2.2　薄壳的稳定性

薄壳的失稳（屈曲）极为复杂，既与壳体的几何形状及尺寸有关，也与壳体的边界条件及受载情况等因素有关。表 6.8-2 列出了最简单也最为常见的球壳和圆柱壳在受到均布外压力时的失稳临界载荷计算公式。

表 6.8-2　圆壳的失稳临界载荷

结构与载荷	临界载荷	备注
球形薄壳	$$p_{cr}=\frac{2E}{\sqrt{3\,(1-\mu)}}\left(\frac{t}{R}\right)^2 \qquad (6.8\text{-}11)$$	p_{cr} 为壳体失稳临界载荷，MPa E 为壳体材料的弹性模量，MPa μ 为壳体材料的泊松比 t 为壳体厚度，mm R 为球壳或圆柱壳半径，mm
圆柱形薄壳块	曲线边自由，直线边简支时 $$p_{cr}=\frac{E\left(\frac{\pi^2}{\alpha^2}-1\right)}{12\,(1-\mu^2)}\left(\frac{t}{R}\right)^3 \qquad (6.8\text{-}12)$$	
	曲线边自由，直线边固支时 $$p_{cr}=\frac{E\,(k^2-1)}{12\,(1-\mu^2)}\left(\frac{t}{R}\right)^3 \qquad (6.8\text{-}13)$$	

α	30°	60°	90°	180°
k	8.26	4.37	3.0	2.0

从表 6.8-2 中临界载荷表达式看出，在均匀外压条件下，可以通过球壳或圆柱壳的 t/R 的比值来控制其稳定性，即增加球壳或圆柱壳的厚度或减小其半径就可以增强其稳定性。这和提高其强度和刚度的措施基本一致。

1.3　薄壁杆及其工作特点

1.3.1　薄壁杆的结构特点

壁宽与壁厚之比大于 5～10，而杆长又远大于杆宽的杆件称薄壁杆。实用的薄壁杆件一般是用薄钢板（厚度在 0.6～8.0 mm之间）经模压或冷弯而制成，其截面形状和尺寸是按最合理的方案进行设计的。截面形状比较简单而用量大的小型薄壁杆件基本定型，常作为结构元件由钢厂进行生产。而复杂或特殊截面形状的薄壁杆件，可用焊接方法把这些元件组焊而成，或另行设计制造。图 6.8-7 示出常用薄壁杆件的截面形式。从图中看出，薄壁杆的截面可分成开口和闭口两类。凡杆件截面为空心周边封闭的都属于闭口截面薄壁杆件，如圆管、方管、矩形管和三角形管等；否则就是开口的。

统计资料表明，相同面积的薄壁型钢和普通的热轧型钢相比，其回转半径可增大 50% 以上，惯性矩及面积矩可增大 50%～80%。说明薄壁型钢的受力性能较好，承载能力较高，整体刚度较大，可节约大量金属材料。例如，用于建筑业，可节省钢材 30%～60%。所以在建筑钢结构中广泛采用，我国制订了《冷弯薄壁型钢结构技术规范》（GBJ 18—87），对薄壁钢结构的设计与计算作了明确的规定。此外，在交通运输业、农业机械等部门也都广泛采用。

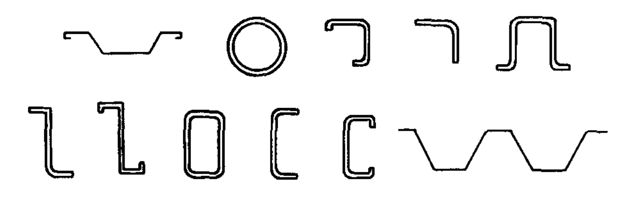


图 6.8-7　常用薄壁杆件的截面形式

1.3.2　薄壁杆的工作特点

薄壁杆件与普通热轧型钢相比较，两者的工作特性有许多是共同的。主要在稳定性以及扭转所引起的应力与变形两个方面有区别。作为压杆的稳定，普通热轧型钢（如工字钢、槽钢或钢管等），只需考虑整体稳定而无需考虑局部稳定，因为在确定型钢厚度时已考虑到局部稳定问题，而当用薄钢板压制或焊制成各种截面形式（如工字形或箱形截面等）的杆件时，除必须考虑整体稳定外，还必须考虑翼缘或腹板的局部稳定问题。

对于受压杆件在弹性范围内整体失稳的临界应力可用欧拉公式表示，详见本篇第 2 章式（6.2-1）。

从该式看出，解决受压杆件整体稳定，主要是控制杆件的最大长细比 λ。λ 越大，即杆件越细越长，则越易失稳。

而解决受压杆件局部稳定的办法主要是控制钢板的宽厚比，如限制钢板的最小厚度或其他构造措施（如折边或加劲肋等）。

薄壁杆件受到横向载荷时，如果载荷没通过其截面的弯曲中心（又称扭心），则杆件不仅发生弯曲，而且还会发生扭转。若杆件是处在两端自由情况下发生这种扭转，其截面的翘曲是自由的，则称这种扭转为自由扭转，它只使杆件截面上产生扭转剪应力；若杆件处在支座或载荷的约束条件下发生这种扭转，其截面的翘曲不自由，则属约束扭转。这时在横截面上就会产生约束正应力和约束剪应力。对于普通热轧型钢来说，这个正应力很小，可以忽略不计。但对于薄壁杆件该正应力可能达到相当水平而不能忽略。在工程实际中遇到的多为约束扭转。

开口截面和闭口截面的杆件只受扭转力时，横截面上产生扭转剪应力的分布规律完全不同，在计算理论上也不一样。图6.8-8示出这两者横截面上剪应力分布的区别。开口截面上的剪应力沿壁厚分布不均匀，外表面最大，中间层为零；而闭口截面上的剪应力沿壁厚均匀分布，中间层剪应力不为零。而且闭口截面切力流在整个截面上是环形封闭，因而其抗扭能力特别强。所以，受扭的薄壁杆应优先采用闭口的截面。

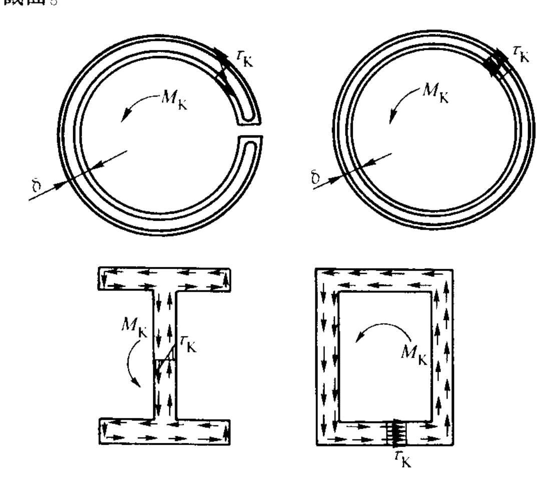


图6.8-8 开口截面与闭口截面杆件受扭的剪应力分布

2 薄壁结构设计要点及连接

2.1 薄壁结构设计要点

（1）选择合理的截面形状

薄壁结构截面尽量设计成闭口形状，可以显著提高结构的承载能力和抗扭刚度，见表6.8-3。对于非封闭的薄壁构件，不仅由于弯曲，而且可能由于自由凸缘的弯曲而造成整个断面扭转引起失稳。例如“L”形及“十”字形断面。

（2）利用曲面

在薄壁上压出曲面（图6.8-9a），在截面及质量不大时，具有高的刚度。这对承受弯曲、压缩和扭转载荷是极为有利的。（图6.8-9b）为管状构件，在管壁上作出曲面后，可以提高其抗弯和抗扭能力。

（3）利用弯边

弯边的薄型材具有较高的局部稳定性和刚度（图6.8-10）。其中图6.8-10c、d不仅在构件边缘弯边，而且在开孔开槽处亦弯边，效果很好。

根据《冷弯薄壁型钢结构技术规范》（GBJ 50018—2002）的规定，一般弯边的高厚比不宜大于12，弯边的最小高厚比应根据待弯边板件的宽厚比按表6.8-4采用。

（4）薄板压型或局部压肋

大面积平薄板可压成波纹板、曲面板或带凸肋的板（图6.8-11）。凸肋的截面可以是半圆形或方形，适当加大高度效果更好，但压肋过高则冲压时材料过分变薄，易开裂。设计半圆形截面的凸肋时可参考图6.8-12所示数据，一般冲压工艺手册都能查到。

（5）采用肋板或骨架

通常在平板上焊接肋板或骨架可以减少板的支承长度，以使薄板结构承受更大的弯矩，并具有足够的刚度。图6.8-13所示的形式，其T形截面可以控制在一个方向上的弯曲，而连接T形截面翼缘的带钢可以增加另一方向上的刚度，但这种结构的抗扭刚度不足。图6.8-14所示的结构是用槽形截面和平板连接形成箱形截面。图6.8-15所示的结构使用了斜肋板。这两种结构形式与T形截面形式相比，不但不降低抗弯矩能力而且大大提高了抗扭刚度，尤其是在45°位置上安放肋板或骨架，将会大大增加平板的抗扭转能力。

表6.8-3 封闭式和开口式截面的对比

断面形状	扭转惯性矩 I			抗扭截面模量 W		
	公式	当 $\delta=0.1d$ 时	比较	公式	当 $\delta=0.1d$ 时	比较
闭口式	$d^3\delta$	$0.1d^4$	100%	$2d^2\delta$	$0.2d^3$	100%
开口式	$\frac{4}{3}d\delta^3$	$0.001\,33d^4$	1.33%	$\frac{4}{3}d\delta^2$	$0.013\,3d^3$	6.67%
闭口式	$\frac{\pi}{4}d^3\delta$	$0.078\,5d^4$	78.5%	$\frac{\pi}{2}d^2\delta$	$0.157d^3$	78.5%
开口式	$\frac{\pi}{3}d\delta^3$	$0.001\,05d^4$	1.05%	$\frac{\pi}{3}d\delta^2$	$0.010\,5d^3$	5.25%



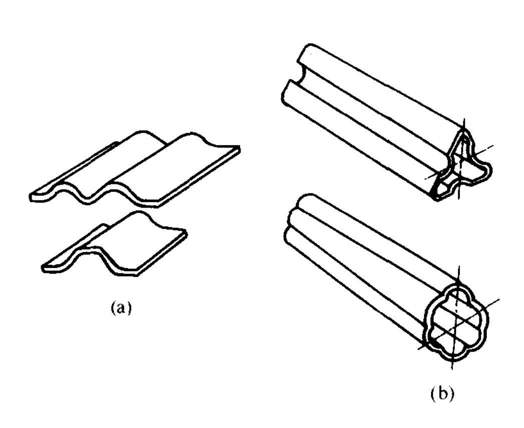


图 6.8-9 利用曲面增强构件刚度

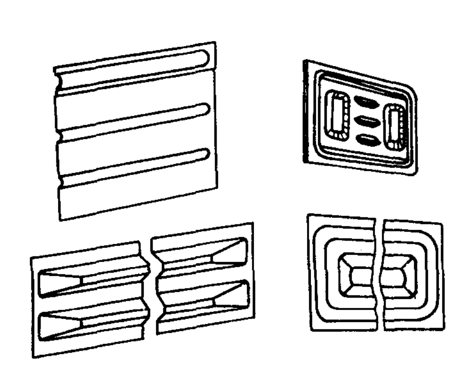


图 6.8-11 薄板的几种压肋形式

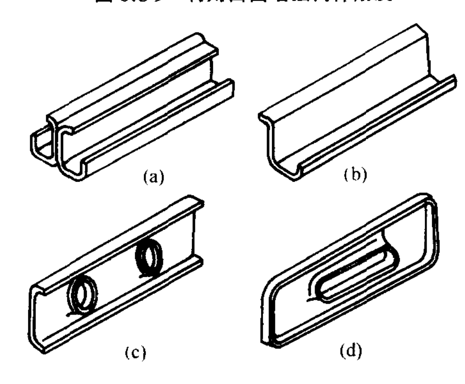


图 6.8-10 弯边增强构件刚度

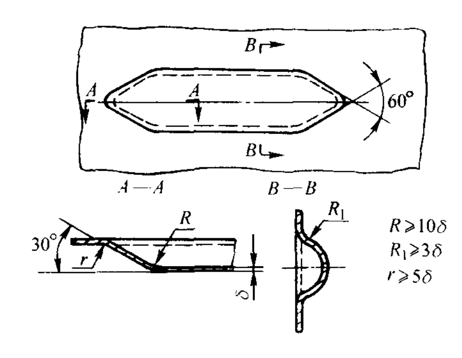


图 6.8-12 半圆形凸肋的形状和尺寸

表 6.8-4 弯边的最小高厚比

	b/δ	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
	a/δ	5.4	6.3	7.2	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0

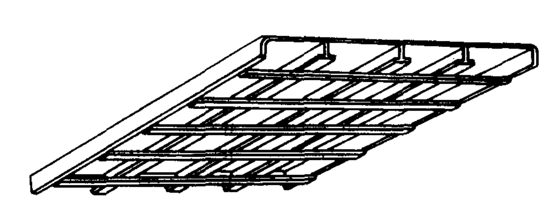


图 6.8-13 焊接 T 形骨架增强刚度

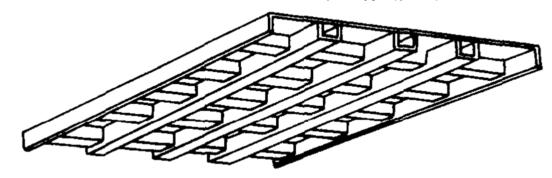


图 6.8-14 焊接槽形骨架增强刚度

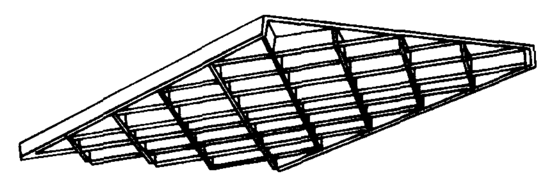


图 6.8-15 45°方向焊接肋板或骨架增强刚度

用薄板冲压成型材作为肋板或骨架焊到薄壁上，既能增加强度和刚度，又能提高稳定性。图 6.8-16 为质量大小相等的各种加肋形式的比较。由图可见，在图 6.8-16a 的 300 mm × 10 mm 的板上焊上不同形式的非封闭型加肋后，惯性矩 J（表抗弯扭能力）都有不同程度的提高。其中图 6.8-16e 的加肋效果最好，它相当图 6.8-16b 的 5 倍。而图 6.8-16f 的加肋虽然与图 6.8-16e 的加肋形状相同，但图 6.8-16f 的加肋布置效果却仅是图 6.8-16e 的一半。另外，图 6.8-16g ~ i 为空心即封闭型加肋，它们与非封闭型加肋比较，其抗扭刚度很大，效果会更好。

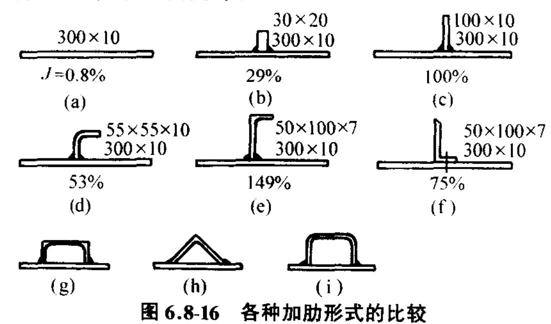


图 6.8-16 各种加肋形式的比较

(6) 减小截面突变

薄壁焊接构件截面形状变化应该力求平缓。当薄壁构件从开口截面向闭口截面变化时，应缓慢过渡，避免刚度发生急剧转变。图 6.8-17a 为不良设计，图 6.8-17b 较好，图 6.8-



17c最佳。

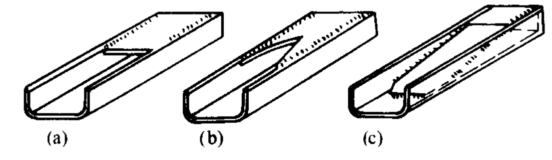


图6.8-17　梁从开口截面向闭口截面的过渡

2.2　薄壁结构的连接

（1）纵梁和横梁的连接

用薄壁型材焊成的承受弯曲和扭转的框架，其纵梁和横梁的连接接头设计时应注意：使结点尽量靠近断面扭转中心；使接头处截面的刚度不产生突变；不损伤纵梁的翼缘。

图6.8-18是纵横梁几种丁字连接的形式，图6.8-18a的连接形式不好，图6.8-18b、c较好，但图6.8-18c比图6.8-18b的扭转刚度低。对于要求扭转顺性好（在扭矩作用下易产生变形）的结构，如越野车辆底架，宜选用图6.8-18c的形式，以降低接头处焊缝的应力。图6.8-18d适用于电阻点焊。

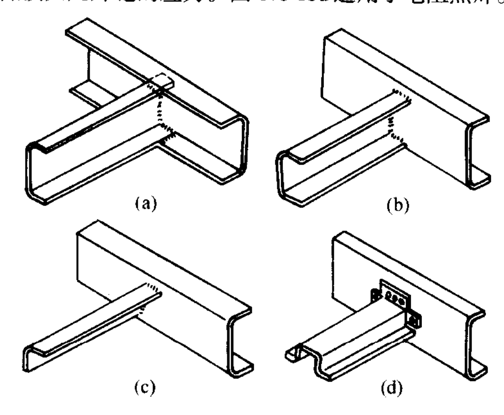


图6.8-18　纵横梁的丁字连接形式（不加肋板）

为了提高扭转刚度，可采用加肋板的T形连接形式（图6.8-19）。图6.8-19a在扭矩的作用下，三角肋板的末端有应力集中，易引起断裂，故不宜用于扭矩大的情况。图6.8-19b肋板的布置，最好放在腹板的三等分处，图6.8-19c用薄板冲压件作肋板效果好，焊接工作量少。对于要求扭转顺性好的部位，需将横梁翼缘切斜，即在扭曲应力较大处不设焊缝。

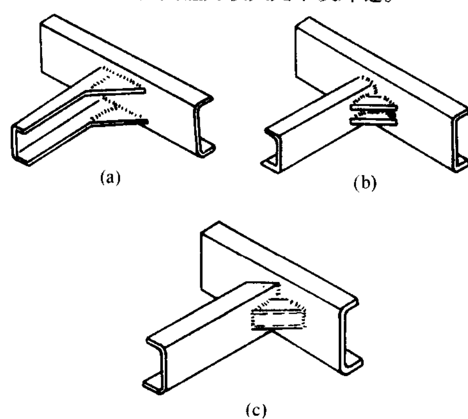


图6.8-19　纵横梁的T形连接形式（加肋板）

（2）纵梁和立杆的连接

对于承受弯曲和扭转载荷的纵梁与立杆连接时，应尽量避免将立杆焊在纵梁受拉的翼缘上，否则会阻碍立杆的扭转变形，并且纵梁受拉翼缘上的横焊缝易破裂。

图6.8-20a仅适于纵梁上翼缘受压的情况；图6.8-20b只能用于受力不大的场合；图6.8-20c～f是比较好的连接形式，图6.8-20f适用于电阻点焊。

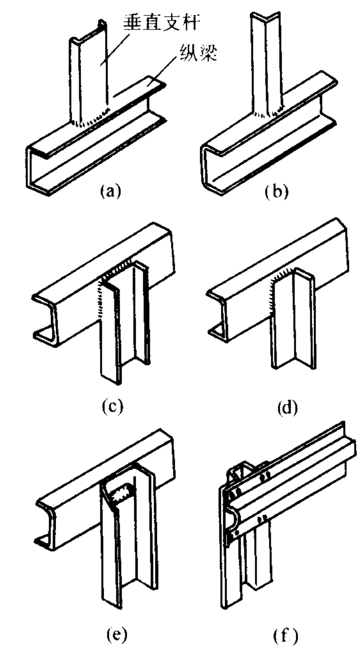


图6.8-20　立杆与纵梁的连接

（3）薄板与薄板的连接

薄板与薄板的连接，无特殊要求时宜采用电阻点焊。设计电阻点焊的接头应注意下列两点。

1）避免用封闭式搭接接头　开式搭接或卷边接头（图6.8-21a）便于在点焊机上焊接。深、长的闭式搭接接头（图6.8-21b）内部无法支撑，单面点焊时，在焊枪压力作用下，外面的板易变形，影响焊点质量。图6.8-22是将封闭搭接接头（图6.8-22a）改为卷边接头（图6.8-22b）的例子。图6.8-23是汽车顶盖板与下后围的接头，从原来的搭接接头（图6.8-23a）改为卷边接头（图6.8-23b）后，不仅接头质量可靠，而且增强了结构的刚度，保证了装配精度。

2）避免三层板搭接的接头　三层板搭接点焊时，分流增加，接头质量不易保证，在不影响工作性能的前提下尽量设计两层板搭接接头（图6.8-24）。

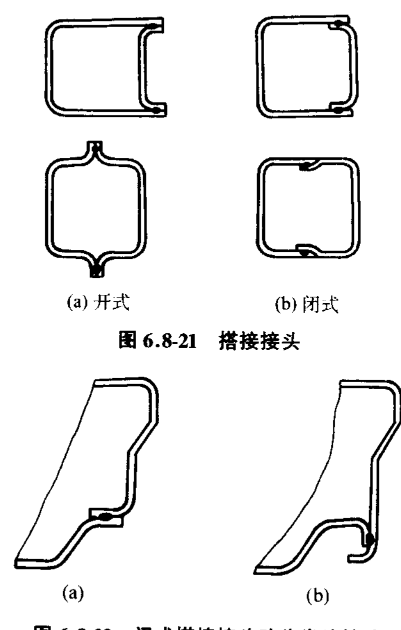


图6.8-21　搭接接头

图6.8-22　闭式搭接接头改为卷边接头



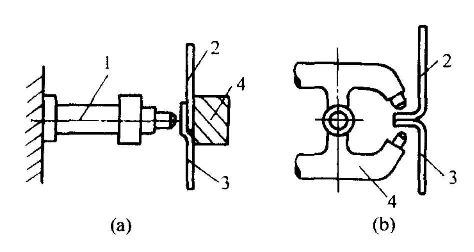


图 6.8-23　搭接接头改为卷边接头
1—反撑焊枪；2—顶盖下盖板；
3—下后围；4—电极

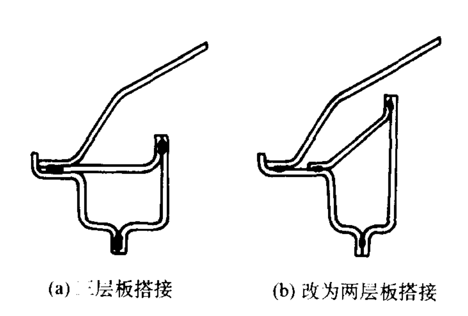


图 6.8-24　三层板搭接改为两层板搭接

3　汽车中的薄壁焊接结构

3.1　汽车车身及其结构特点

汽车种类很多，各有特点和性能要求。但每一类汽车的总体结构都是由动力装置、底盘、车身和电器仪表等四部分组成。

汽车车身是指汽车载客、载货和覆盖的壳体部分以及一些功能件和装饰件。车身壳体部分是车身的本体，是一个典型的薄壁焊接结构。车身的蒙皮是薄壳，车身的骨架是薄壁杆，两者通过焊接方法连接成一个有机的整体而共同承载。使整个车身成为质量轻、强度高、刚性大、抗扭能力强的壳体，能承受行驶过程中的一切载荷。如客车和轿车车身、货车驾驶室以及大型专用车的车厢等都属于这类结构。

质量轻、容载量大、强度高和刚性好、安全可靠等是对车身设计的基本要求，对载人的客车和轿车等还对舒适、美观和耐用等有更高的要求。

汽车车身结构按其受力情况，大致分为非承载式和承载式两类。前者将发动机及底盘各总成固定安装在具有整车长度的完整车架上，并且车身通过橡胶悬置装置与车架连接，车架是整车承载的主体，故又称为有车架结构；后者则是将发动机和底盘各总成直接安装在车身本体上，车身承受整车载荷，故又称无车架结构。承载式车身质量轻、刚性大、车身高度可降低，故其使用范围逐渐扩大。但车身受力大，不易隔振。

车身上的蒙皮和骨架用的都是薄壁冲压件，故所用材料最多的是薄钢板。外观件广泛采用平整光滑的冷轧钢板，其厚度一般为 0.6 ~ 1.0 mm；非外观处的构件多用热轧钢板，其厚度为 1.2 ~ 1.4 mm，结构加强件多用大于 1.6 mm 的热轧钢板。为了减轻车身质量，可以采用铝合金板，它的比强度和比刚度均较大，在同样强度和刚度下，其质量可比钢减轻 40% ~ 50%。但价格比钢材高，成形性能也较差。

车身的焊接方法主要是电阻点焊和气体保护焊（焊钢用 CO_2 气体保护焊，焊铝合金用脉冲 MIG 焊），以减少焊接变形和保证焊缝质量。

本节介绍几个典型的汽车车身的结构，以说明薄壁焊接结构在汽车制造中的成功应用。

3.2　轿车车身的焊接结构

3.2.1　轿车车身组成

轿车车身由车身本体、外装件、内装件和电器附件等组成。车身本体则由图 6.8-25 所示的构件组成。它是一个由许多复杂而又庞大的薄板冲压件焊接、装配的集合体，以提供车身所需的承载能力。

若按构件的功能分，可将车身本体的这些构件大致归纳为覆盖件，梁、支柱及结构加强件三类。

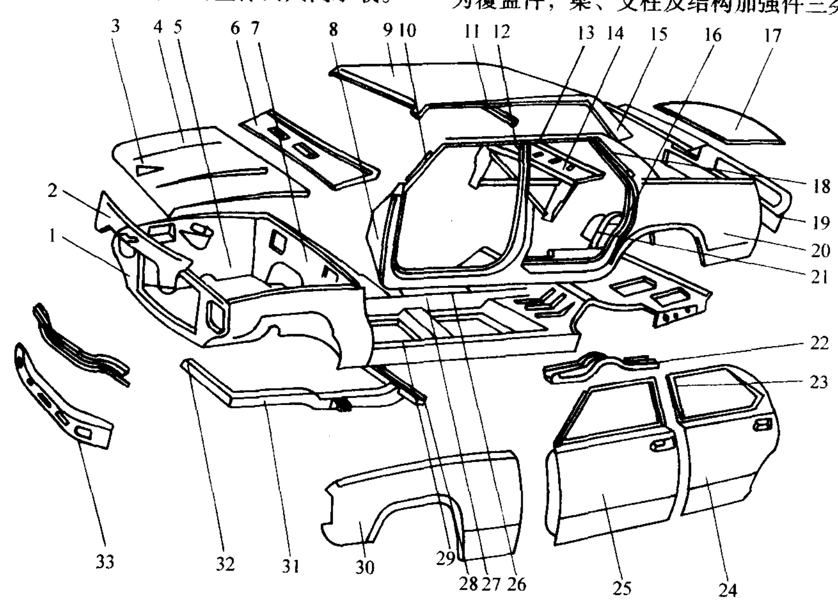


图 6.8-25　轿车车身本体结构
1—散热器固定板；2—发动机罩前支撑板；3—标志；4—发动机罩；5—前挡泥板；6—前围上盖板；7—前围板；8—前围侧板；9—顶盖；10—前立柱；11—顶盖横梁；12—中立柱；13—上边梁；14—后窗台板；15—后顶盖侧板；16—后围上盖板；17—行李舱盖；18—流水槽；19—后围板；20—后翼子板；21—车轮挡泥罩；22—后纵梁；23—门窗框；24—后门；25—前门；26—门槛；27—地板通道；28—地板横梁；29—地板；30—前翼子板；31—前纵梁；32—前横梁；33—前裙板



1）车身覆盖件　是指车身中用以包覆梁、支柱等构件并具有较大空间曲面形状的表面（即蒙皮）和车内板件。其功用是：封闭车身、体现车身外观造型和增大结构强度和刚度等。

2）梁、支柱　是指支承车身覆盖件的全部车身结构零件，又称车身结构件。由这些结构件就组成了轿车车身的承载骨架结构，见图 6.8-26。它是车身承载能力的基础，对保证车身所要求的结构强度和刚度非常重要。

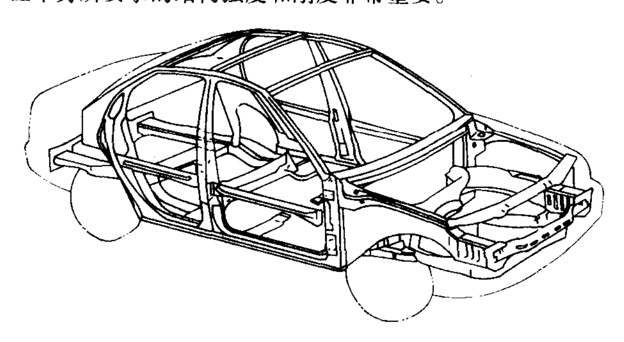


图 6.8-26　轿车车身的承载骨架结构

为了减轻车身质量，有些部位闭口截面的梁或支柱不必预先单独制备，而是在内外板有梁、柱部位预先冲压成形，内外板一组合便构成所需的闭口截面梁或支柱。这种作法充分发挥冲压与焊接两个制造工艺的特点。

因此，在设计时首先要确定这些结构件与板件的连接关系；再根据整车的受力情况，特别是车身结构的受力情况和车身结构的安全要求，合理进行构件布置；根据车身承受的弯曲和扭转的大小，确定采用开口截面还是闭口截面，并设计截面的形状及尺寸大小；此外，还要考虑车身外形设计、车内安全性、构件连接方式以及装配和焊接工艺、车身各部分的密封、防腐等性能要求。

3）结构加强件　主要用于加强板件的刚度，提高各构件的连接强度。

在车身本体结构中，按各构件所在位置，还可将它划分为车身前部结构、前围结构、地板结构、侧围结构、顶盖结构、车身后部结构和车门结构等。

3.2.2　车身车架焊接结构

非承载式车身具有与车身分离的贯穿整个车身前后的车架，一般由纵梁和横梁等构件组成。现代轿车普遍采用边梁型车架（见图 6.8-27），其车架纵梁中部紧贴着车身地板的两侧边。这种车架结构及其与车身地板布置的关系，有利于降低车身地板的高度，提高车辆侧面碰撞的安全性。

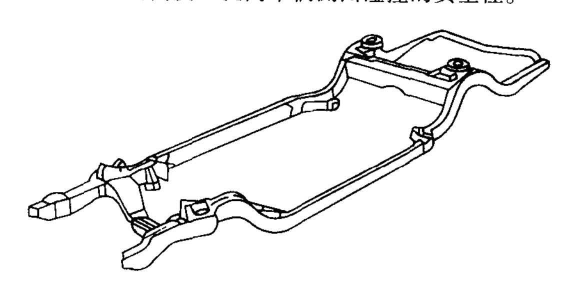


图 6.8-27　汽车的边梁型车架

车架应满足以下结构要求。

① 能支承发动机、驱动装置和悬架等总成构件。

② 承受由车身和底盘部件传来的作用力。

③ 在尺寸限定范围内选择最有效的截面形状和尺寸，并保证其具有承受撞击和振动的足够强度。

④ 应对车身座舱具有安全保护作用。当发生正面或后面碰撞时，撞击能量应首先由车架承受，并传递到指定部位。

轿车车架构件一般采用板厚为 2 ~ 3 mm 的矩形截面梁，有闭口和开口两种截面形式。车架纵梁各部分采用不同的截面形状，以改善纵梁的受力状况和碰撞时能量传递的特性。

图 6.8-28 为边梁型车架纵梁中部与车身地板和门槛的布置关系。对于封闭截面的门槛梁，车架纵梁布置在门槛的内侧，会增加门槛的宽度；对于开口截面的门槛梁，边梁则布置在门槛梁的截面内。

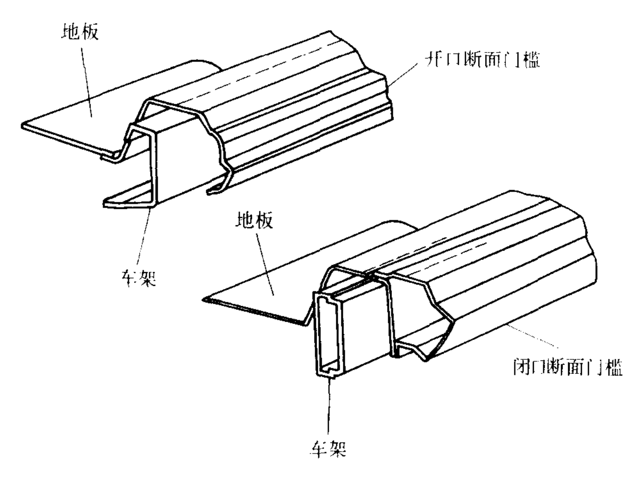


图 6.8-28　纵梁中部与车身地板和门槛的布置关系

边梁型车架的中部与前后两端较狭窄部分的纵梁采用弯曲状的箱形截面梁连接，这种箱形截面梁具有大的抗扭性能，并能吸收由路面传来的冲击，减小振动，降低室内噪声。通过控制箱形截面梁的弯曲刚度和车架前、后碰撞时的变形，吸收部分碰撞能量，以提高车辆前、后碰撞的安全性。

3.2.3　车身地板焊接结构

车身地板结构是车身的支承部分。无论是非承载式车身还是承载式车身，在结构设计上车身地板结构都应提供足够的强度和刚度以保证车身的承载能力。现代轿车为满足造型和视野等的要求，广泛采用细窗柱、大面积玻璃和薄车顶等结构形式，由此加大了车身底部结构部分的承载分量，于是对车身地板结构的承载能力要求更高。此外，地板结构的防振、隔音和防腐性能的高要求以及车身室内居住性的不断改善对地板布置均有一定影响，因而合理设计地板结构成为车身设计的重要环节。

图 6.8-29 是承载式车身的地板结构。主要由地板、地板梁、支架、地板通道、门槛、连接板、座椅支架等构件组成。它们都是薄壁构件，各自按所处的地位与作用而采用不同的构造形式。

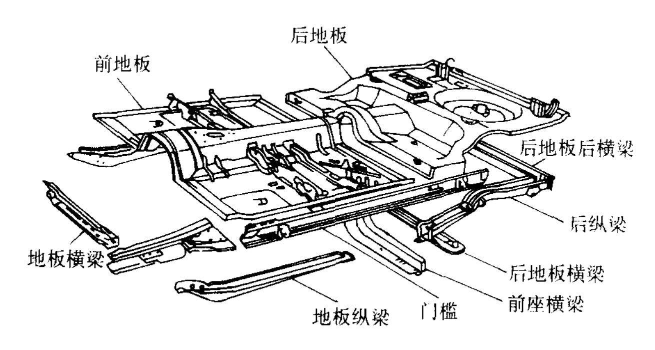


图 6.8-29　承载式车身的地板结构



1）地板　是指车身座舱和行李厢下的地板。它不是简单的一块平板，而是具有凹凸不平的、局部有阶梯形的薄壁壳体。这些高低不等的凸台、窝穴或阶梯，长短不一和深浅不同的沟槽等，有些是功能所需，如需布置油箱、备胎，安装座椅，给出传动轴通道等，有些则是为了提高地板局部强度与刚度所需。考虑便于制造，一般把整个地板分为前地板、中地板和后地板，分别制备后再连接起来。

2）地板梁　它是地板的结构加强件。主要有地板横梁、后地板后横梁、地板连接横梁、地板纵梁、后地板纵梁和其他地板加强梁等。它们直接焊到地板上，构成板架结合体。成为整个车身地板结构的主要承载构件。

3）门槛　它是车身地板结构的纵向加强梁，又是支承车身侧围的前、中和后支柱的下边梁，在车身结构中起着重要作用。一般设计成闭口（封闭）截面以提高其抗扭性能，见图 6.8-30。为了提高强度和侧面碰撞安全性，有时在门槛截面内加设加强板。这是很典型的一种封闭薄壁杆结构设计的例子。

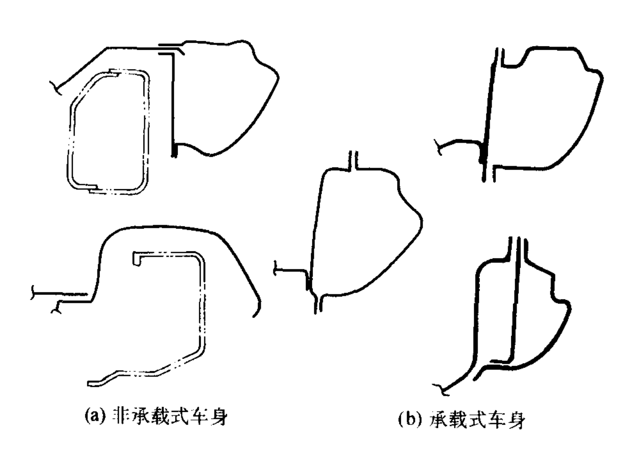


图 6.8-30　轿车车身结构门槛的各种截面形状

3.2.4　车身侧围焊接结构

轿车车身侧围形成车身侧壁部分，是组成座舱的重要结构总成。主要由侧围梁框架、车门、后翼子板和后轮罩等构件或总成组成，见图 6.8-31。

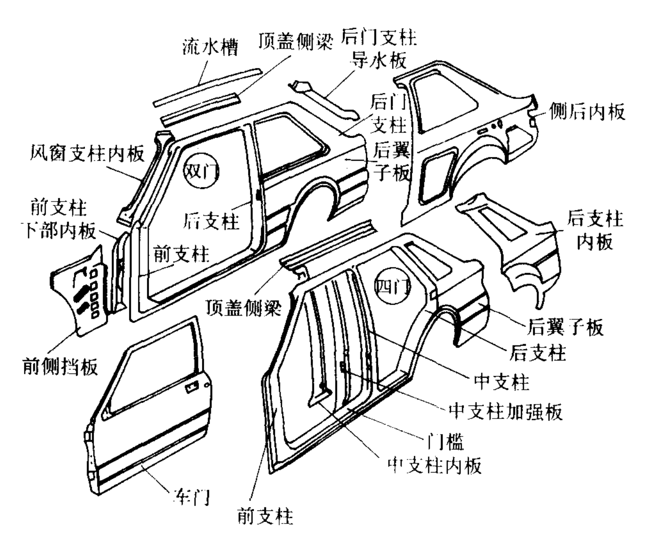


图 6.8-31　轿车车身侧围结构

1）车身侧围梁框架　它是支撑顶盖，连接车身前、后部分的侧面构件，固定前、后风窗玻璃，并用以安装车门以及保证车身侧面碰撞安全性的承载框架。要求具有较大的抗扭刚性和强度。

对于四门轿车，侧围梁框架主要由前支柱、中支柱和后支柱以及顶盖侧梁和门槛等构件组成。前已述及的门槛，它既是地板结构的纵向加强梁，又是侧围梁框架的下部纵向连接梁，地位重要。各支柱及顶盖侧梁的截面形状如图 6.8-32 所示，它们都是典型的薄壁杆，是由薄钢板冲压件组焊而成的闭口截面结构，均具有很好的抗弯和抗扭性能。这种设计，也充分发挥了冲压和焊接两种制造工艺的特长。此框架中，顶盖侧梁的地位很重要，它既是车门的上门框，又是支撑和固定顶盖的边梁。它的抗弯和抗扭转刚度对整车的抗弯和抗扭刚度影响很大。因此，其截面形状及尺寸的设计应满足整车的刚度要求。此外，它的设计还应考虑车身的侧向视野、造型、内部头顶空间、上下车方便、结构密封和防腐等要求。

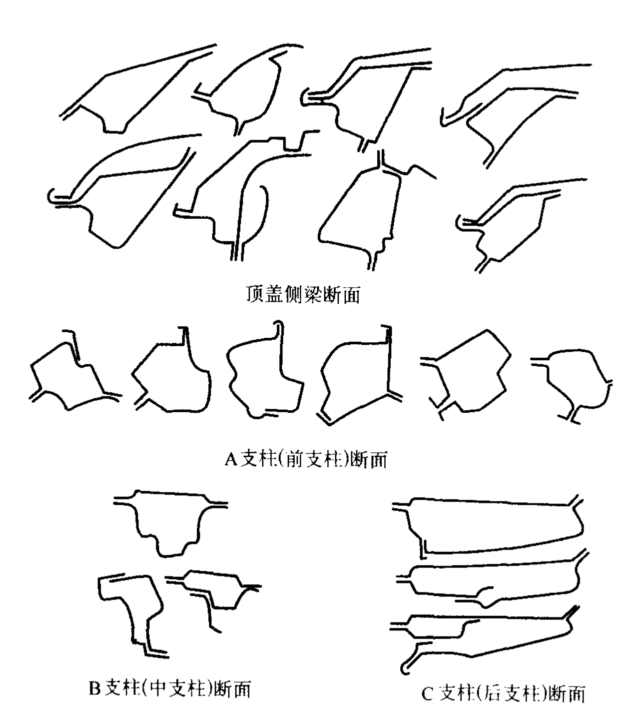


图 6.8-32　侧围梁框架各支柱及顶盖侧梁截面

2）车门结构　它是轿车车身侧围的重要组成部分。一般采用旋转式车门，主要由门体、车门附件和内饰盖板三部分组成。门体是焊接结构件，分有窗框式和无窗框式两种。为了保证车门工作可靠、减小车门部分振动、提高车辆侧向碰撞的安全性，门体应具有足够的强度和刚度。图 6.8-33 为典型的薄壁门体结构，它的设计能很好地满足上述要求。车门外板一般采用 0.6～0.8 mm 的薄钢板冲压成形。它须符合车身造型要求，由于轻量化和侧面碰撞安全性的要求，广泛使用高强钢板；根据车辆侧面碰撞时的强度要求，采用了车门加强梁，并采用高强度钢板制造；车门内板是车门的重要支撑件，又是车门附件的安装体，采用较车门外板厚的薄钢板来制造。板面上除根据需要冲压出各种形状的托台、窝穴、手孔和安装孔等外，还冲压出各种加强肋，提高了车门内板的刚性，减小振动噪声；为了提高门体的局部刚度和连接强度，在车门内外板上适当采用加强板。

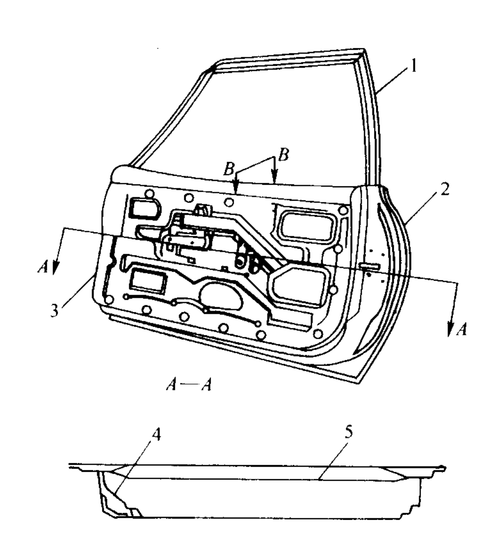
3.3　客车车身焊接结构

客车按车辆长度分为微型、轻型、中型、大型和特大型 5 类，其中以大型客车最具代表性。因为它是由蒙皮和骨架组焊而成的箱形薄壁结构的典型。外蒙皮一般采用 0.8～

1.0 mm的薄钢板，骨架也多是薄钢板冲压而成的薄壁杆件。

客车车身按其承载型式分非承载式、半承载式和承载式三类。

1) 非承载式车身　这是一种在底盘车架上组装独立的车身的客车结构形式。车身通过多个悬置胶垫支承在车架上。整车载荷主要由车架承担，车身只在很小的程度上承受由于车架弯曲和扭转所引起的载荷。这种车身具有舒适、寿命长、装配工艺简化和安全等优点，但有着整车自重大、结构笨重、布置尺寸受到限制等缺点。



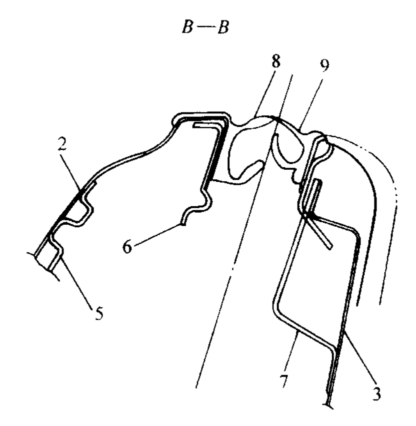


图 6.8-33　汽车门体结构

1—车门窗框；2—车门外板；
3—车门内板；4—车门铰链加强板；
5—车门加强横梁；6—车门外板加强板；
7—车门内板加强板；8—外密封条；9—内密封条

2) 半承载式车身　这是一种保留了底盘车架，将车身结构件刚性地与车架连接，使车身也参与整车承载的客车结构形式。由于车身与车架共同承载，从而可适当地减轻车架的质量和减小截面尺寸，以达到合理利用材料的目的。

车身与车架的刚性连接是通过将车身骨架的立柱焊接在车架纵梁两侧悬伸的横梁支架上实现的，而车身地板梁结构则更进一步加强两者的刚性连接。因此，对于这种车身结构，其车身骨架立柱、地板梁构件和车架纵梁上的外伸横梁支架的设计、布置及连接关系，是车身结构设计的关键，同时也决定了车身结构的承载能力。此外，还应充分考虑底盘的结构布置关系。

3) 承载式车身　这是一种无车架的，整车载荷由车身承担的客车结构形式。按车身上部和下部承受载荷的程度不同又分为底架承载式和整体承载式两种结构。

底架承载式车身结构有一个由型钢或钢板冲压件焊接而成的主要承载底架，见图 6.8-34。该底架具有贯通式纵梁和一些与车身同宽的横梁，车身骨架与这些横梁刚性焊接，使整个车身与底架形成一个刚性空间承载系统。这种结构可设计较细的窗柱结构、宽的侧窗，从而对造型设计限制不大。底架纵梁和横梁的高度可达 500 mm，因而车身地板位置较高。地板下方有较大空间，可用作行李舱和布置车辆必要的设施。故适用于大型长途客车和旅游客车。

整体承载式车身结构的特点是组成车身壳体的车身骨架和内、外蒙皮都参与承载，图 6.8-35 为这种车身的骨架。这种车身经过精心设计计算，使各构件承载时相互牵连和协调，充分发挥材料的最大潜力，使车身质量最小而强度、刚度最大（甚至可取消前后贯通的底架纵梁)。与底架承载式车身结构相比，整件承载式车身结构除了质量更小以外，还可使整车高度降低。但这种结构要以先进的设计计算技术和工艺技术为后盾。

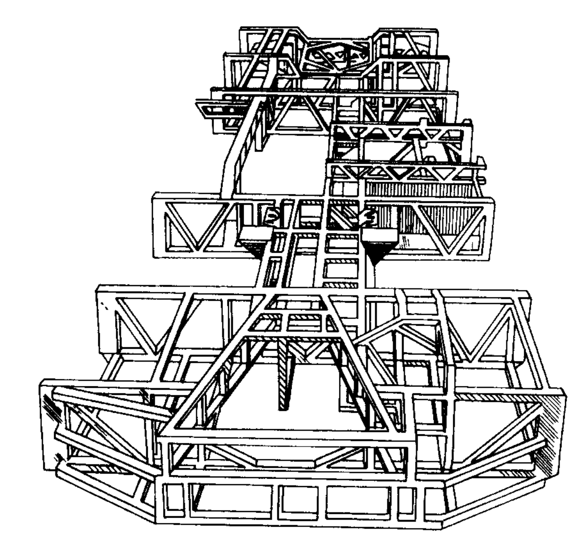


图 6.8-34　大型客车的承载底架结构焊接结构

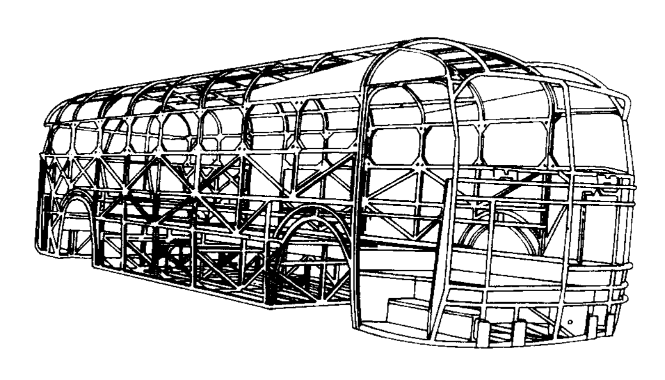


图 6.8-35　整体承载式客车车身骨架焊接结构

3.4　货车车身焊接结构

3.4.1　驾驶室的焊接结构

绝大多数货车驾驶室都是非承载式结构，并采取 3 点或 4 点悬置方式与车架连接。按它与发动机的相对位置，驾驶室有如图 6.8-36 所示三种结构类型。



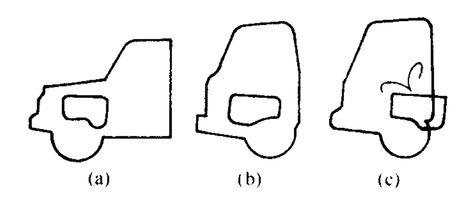


图 6.8-36　货车驾驶室的三种结构类型
(a) 发动机在驾驶室前面（长头车）；
(b) 发动机在两座位之间（平头车）；
(c) 发动机在座位下面（平头车）

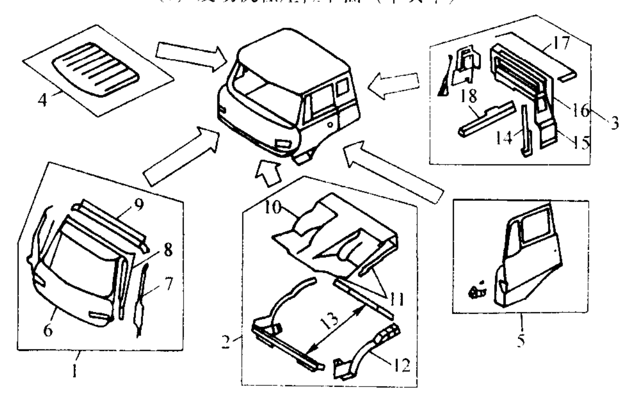


图 6.8-37　驾驶室车身结构
1—前围；2—地板；3—侧围和后围；4—顶盖；
5—车门；6—前围外板；7—前支柱；8—前风窗框外板；
9—仪表板横梁；10—地板；11—侧梁；12—纵梁；
13—横梁；14—后支柱；15—侧围板；16—后围板；
17—顶盖后梁；18—门上梁

图6.8-37为平头式驾驶室车身结构，它主要由前围、地板、侧围、后围、顶盖和车门等部件组焊而成。

（1）前围

前围分内板式和外板式两类，见图6.8-38。内板式前围用于发动机安装在前围之前的长头货车上。前壁板为发动机挡板，由于在前围板上安装有空调装置、刮水器装置、制动油罐等，以及导线和油管通过，故对此板要求有足够的刚度和强度，还要求形状尺寸准确；外板式前围多属于平头式货车的前围，发动机安装在前围之后。它又可分为单层式和双层式两种。

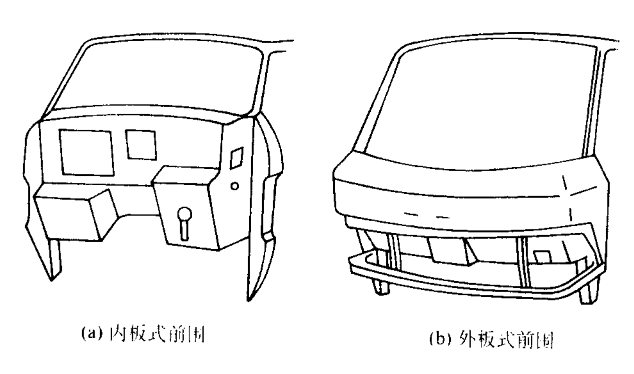


图 6.8-38　前围的两种类型

双层式前围多用于中型和重型载货汽车。将前围板分为外板和内板，外板是覆盖件，并起装饰作用，可拆卸；内板是受力件，功用同内板式前围。双层式前围的优点是：因可拆，故维修方便；有较宽敞的空间；密封效果和结构强度得到改善等。

单层式前围多用于轻型载货汽车，其前围外板既是覆盖件，又是受力件。因而具有结构简单、质量小、工艺好等优点，但不具备双层式前围多方面的优点。

前围多是由“日”字形骨架与前围板蒙皮共同构成的封闭体，是电阻点焊薄壁结构设计的典型。“日”字形骨架由上梁、中梁、下梁和前支柱组成。上梁即前风窗上横梁，有开口和闭口之分，如图6.8-39所示；中梁或由前围板上外板与内板及其加强梁焊接而成，或是由发动机挡板与仪表板固定板焊接而成，也分开口截面和闭口截面两种，如图6.8-40所示。下梁是在前围内板与地板焊接处的加强梁，它将左、右支柱连接，形成了前壁骨架的框形框架，见图6.8-41。

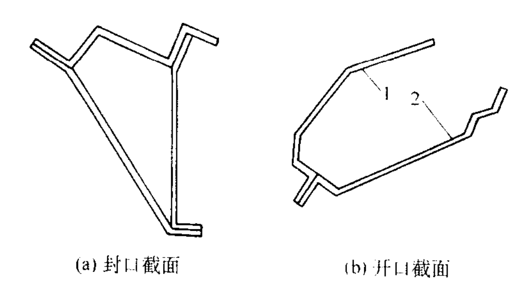


图 6.8-39　前围上梁的截面结构
1—顶盖；2—内板

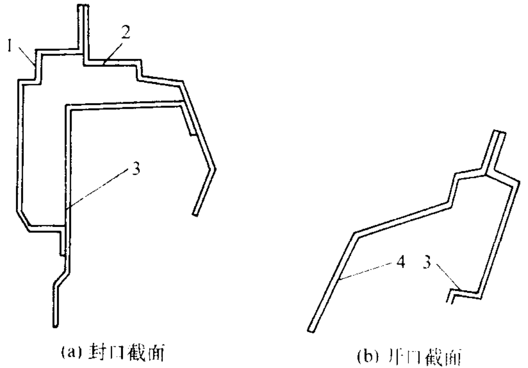


图 6.8-40　前围中梁的截面结构
1—上外板；2—内板；3—加强梁；4—前围外板

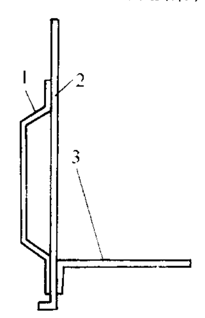


图 6.8-41　前围下梁的截面结构
1—加强板；2—内板；3—地板

（2）地板

驾驶室地板由地板和地板梁组成。地板是大面积冲压的薄板件；地板梁是主要支承和受力件，多由厚2 mm左右的钢板冲压而成。它是驾驶室的基础，车身的上部件焊在其上面，通过悬置与车架连接。乘员的重力压在地板上，故要求地板需有足够的强度和刚度。

图6.8-42为典型的中、重型平头车地板结构。地板上面要安装座椅及安全带等的加强板，为加大刚性，应尽量多布置有效加强肋。限于材料尺寸、冲床面积和冲压深度的限制，一般将地板分为三块，然后焊接在一起。长头车和轻型车地板较小，可以不必分块。

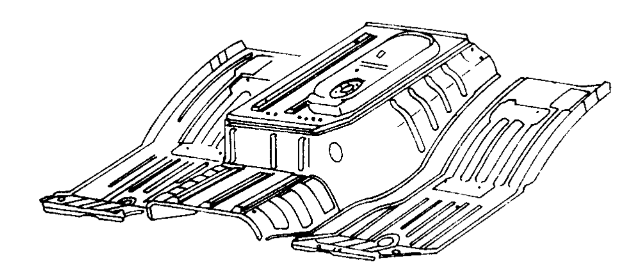


图 6.8-42　平头车地板

（3）地板梁

驾驶室地板梁多为纵、横梁组成的框架结构。平头车以两根纵梁为主要构件，前后有横梁，两侧有门槛，共同组成地板梁骨架（见图 6.8-37 中的 12、13）。地板梁多为槽形截面，与地板用电阻点焊焊接。

（4）侧围、后围及顶盖

驾驶室的侧围、后围及顶盖均为薄板冲压件。顶盖为单层结构，为增加刚性内设 1～2 根横梁；侧围和后围有单层板的，也有双层板的；后围有后围窗、侧围面积较大时、也设侧围窗，侧围窗可以是封闭的，也可以是开启的。长头车后围与顶盖典型结构如图 6.8-43 所示，充分利用冲压凸肋和边缘折边的结构来增强薄壁构件的刚性和稳定性。图 6.8-44 是平头车的侧围、后围及顶盖典型结构，侧围和后围为双层板结构。

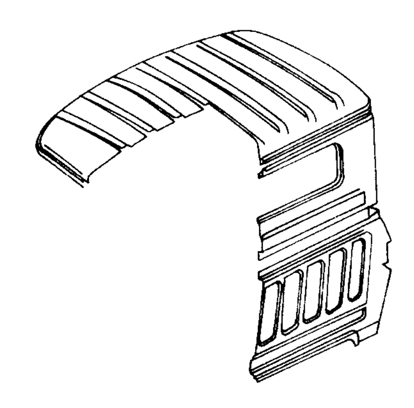


图 6.8-43　长头车的后围与顶盖结构

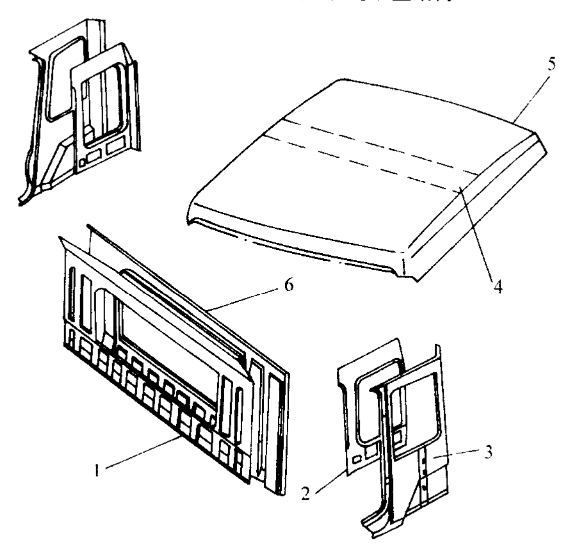


图 6.8-44　平头车的侧围、后围及顶盖结构
1—后围内板；2—侧围内板；3—侧围外板材；4—顶盖梁；5—顶盖；6—后围外板

3.4.2　全钢车箱的焊接结构

货车的车箱多为栏板式车箱，主要由底板和边板组成。其结构有全木结构、全钢结构和钢木混合结构三种。全钢结构车箱由钢板冲压、焊接而成，见图 6.8-45。边板的高度一般在 400～600 mm 之间，不宜过高，否则容易使汽车质心升高，从而降低汽车的稳定性，同时装载货物也不方便。一般不设纵梁，为了增加边板和底板的刚性，通常都冲压出瓦楞状凸肋。图 6.8-46 为整体瓦楞型货车边板截面结构。

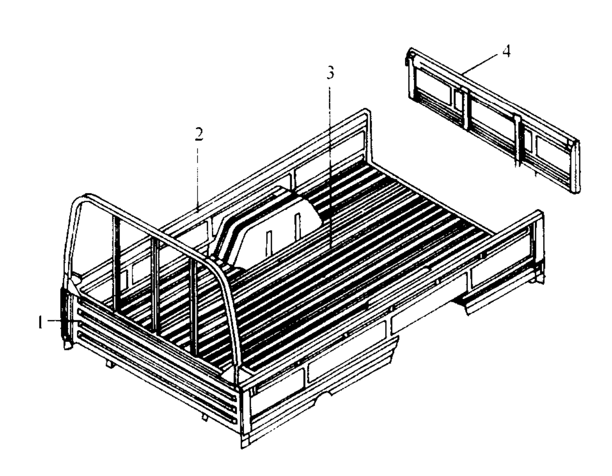


图 6.8-45　全钢货车车箱
1—前板；2—右边板；3—底板；4—后边

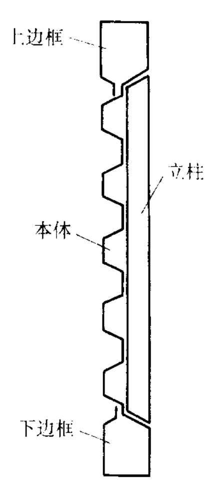


图 6.8-46　整体瓦楞型货车边板截面结构

3.5　电阻点焊薄壁结构设计注意事项

汽车车身的壁厚一般在 2 mm 以下，各零部件之间主要是采用电阻点焊方法进行连接。因此，设计这类薄壁结构时必须充分考虑电阻点焊的工艺特点，一般应注意如下事项。

（1）便于焊接

要给电阻点焊留出操作空间。尽量使所设计的结构能用标准电极，最好在一个焊件上只用一种类型和规格的电极，以减少更换和调试电极的时间。图 6.8-47a 的结构难以施焊，它必须采用弯曲的特殊电极，若改用图 6.8-47b 所示的结构形式，不仅施焊容易，而且能保证焊接质量。图 6.8-48 所示的窄而深的结构，它需用特殊电极，冷却条件不好，电极易磨损。图 6.8-49 给出了电阻点焊操作空间与工件形状尺寸之间的关系。用点焊机器人焊接时，其点焊钳对需焊各点均应可达。



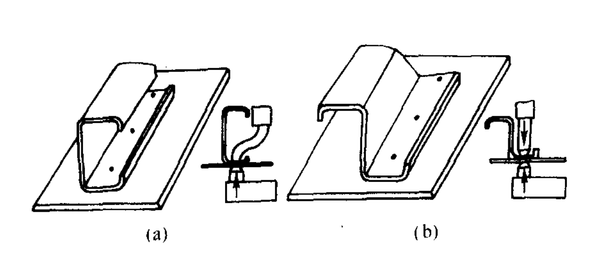


图 6.8-47　电阻点焊构件形式

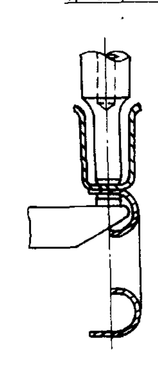


图 6.8-48　U形截面构件的点焊

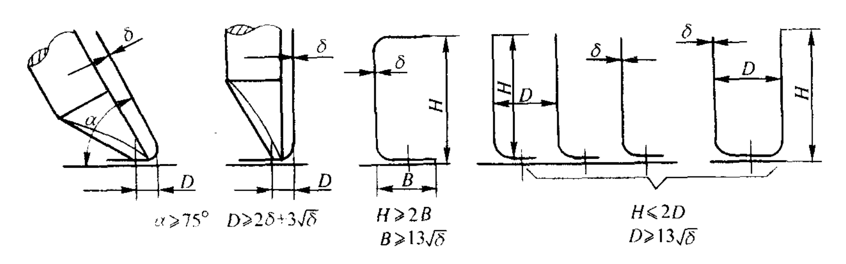


图 6.8-49　电阻点焊操作空间与工件形状尺寸关系

(2) 合理布置焊缝

电阻点焊焊缝适宜在剪力下工作，不适于在拉伸力下工作，因而选择连接方案及焊点的布置十分重要。图 6.8-50 (a) 所示的连接为不合理的设计，而图 6.8-50 (b) 所示的为合理设计。

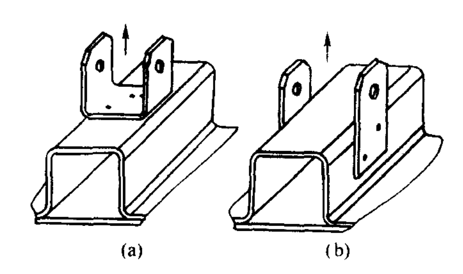


图 6.8-50　电阻点焊接头形式

薄壁结构上焊缝的位置应有利于控制装配误差和焊接变形。带孔洞的薄壁结构，孔洞宜开在一个构件上，避免焊缝布置在有孔洞的地方。图 6.8-51 为汽车变速箱检查孔处焊缝的两种不同布置，图 6.8-51a 装配精度不稳定，尺寸 H 不易保证，且底板刚度变差；图 6.8-51b 的设计较为合理。

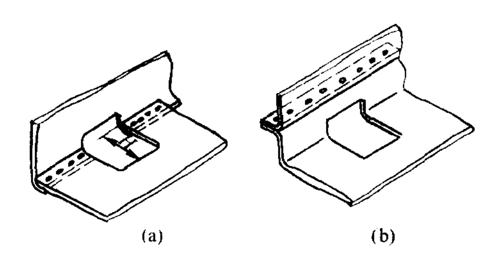


图 6.8-51　汽车变速箱检查孔处焊缝的布置

(3) 合理布置焊点

点焊缝上焊点的节距不宜过小，否则分流过大，焊点质量不易保证。另外，焊点的边距亦不宜过小，否则在焊接过程中会发生内部飞溅或板边的翘曲变形，导致连接强度的降低。《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GBJ 18—87) 规定：电阻点焊焊点节距（中心距）不宜小于 $15\sqrt{t}$，焊点的边距不宜小于 $10\sqrt{t}$，（t 为相连板中外层较薄板件的厚度）。焊接大零件时，节距可以适当加大，一般不小于 35～40 mm。非受力部位，节距还可以加到 70～80 mm。焊接奥氏体钢时节距要比结构钢小 15%～20%；焊接铝合金时，节距要比结构钢大 25%～30%。

采用点焊时，结构钢的厚度一般不大于 3 mm，而且点焊两板的厚度差不大于 3 倍。在不得已需要采用三层板搭接时，为减小分流，保证焊点质量，其节点距要比焊两层板的大。当三层板板厚有差别时，其厚者应置于中间。设计多点焊的结构时，焊点之间的距离要求不小于 50 mm，以利于焊枪的布置与设计。

(4) 易于装配与定位

大量生产的冲压件可以在适当部位设计一些起定位作用的定位台阶、定位凸台或槽口等（图 6.8-52）。在装配时，各零部件之间的定位既方便，又准确，且减少辅助时间。

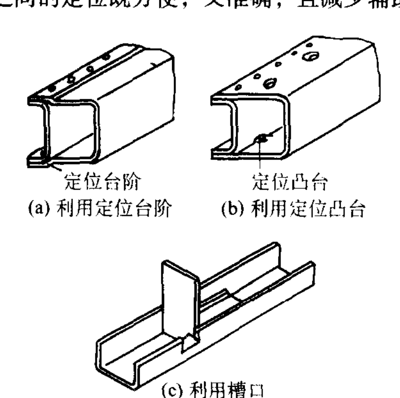


图 6.8-52　易于装配与定位的冲压构件

(5) 防止锈蚀

薄壁构件因壁厚较薄，锈蚀问题对结构的承载能力和正常使用的影响较为严重。设计时，应尽量选用耐腐蚀性较强的钢材、铝合金等。并且应根据情况选用防腐涂层（涂料等）。在无法防止锈蚀又难以维护的部位，应在设计时预先考虑腐蚀裕度，增加构件壁厚。另外，在结构设计时，应采用便于检查、清刷、涂料及不易积灰尘和积水的构造形式。



当采用闭口截面时，沿全长和端部均应焊接封闭。采用开口截面时，开口应向下。在可能淋雨积水的构件（如节点板夹缝）不易再次用涂层维护的部位，均应采取适宜措施密封。构件的连接应采用连续焊缝，不宜用断续焊缝。结构表面要尽量光滑平整，可以适当开排水孔或流水槽等以防止积水。

4　铁路车辆中的薄壁焊接结构

4.1　客车车体的组成及其工作特点

铁路车辆中乘载旅客的车体称客车车体。它和汽车的客车车身一样，也是很典型的薄壁全焊结构。结构形式基本上是由蒙皮和骨架组成的空心箱体，俗称车厢。由于铁路客车客载量大，车体长，需有较大的承载能力，故蒙皮采用较汽车车身厚的薄钢板（1～2 mm），而骨架在受力较大处采用普通型钢或专用型钢，受力一般的则采用钢板冲压成形的薄壁杆件。现代的铁路客车车体已广泛采用整体承载的车体结构，图6.8-53是较典型的一种车型车体结构的截面。整个车体由两个转向架在下面支承，运行时它就是一根薄壁箱形梁。

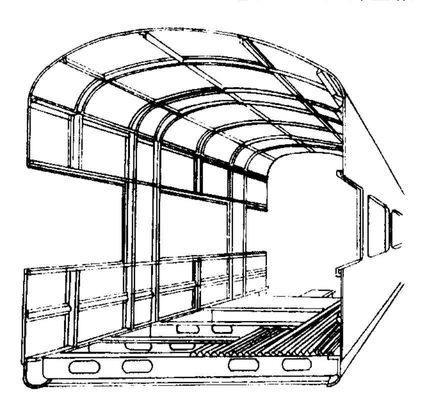


图6.8-53　25.5 m新型客车车体结构截面

通常把车体空间上的六个面划分为底架地板，左、右侧墙，前、后端墙（图6.8-53中没示出），车顶（棚）等六大部件。每个大部件都是把蒙皮和骨架先焊在一起，然后再由这六大部件总装和焊接成整个闭式箱体。蒙皮虽薄，但它却是由地板、侧板、顶板和端板构成一个很大的上部带圆弧，下部为矩形的闭口壳体，具有很高的抗扭刚度；通过总装焊接把各部件的骨架交织成一个完整的网格结构，其纵向构件主要承受纵向力和纵弯曲；其横向构件除承受横向弯曲外，更主要是横梁和立柱构成了和车体截面形状相一致的封闭框架，受弯、扭作用时，起着保持车体截面形状的重要作用。这些都是获得很高的薄壁结构整体抗弯和抗扭强度与刚度的结构措施。由于蒙皮与整个网格状骨架焊在一起，就把薄壁蒙皮进行了分隔，于是提高了蒙皮的整体和局部稳定性能。下面只介绍三个典型部件的焊接结构。

4.2　底架焊接结构

图6.8-54所示为国产22型硬座客车车体底架结构。底架是整个车体的基础，它通过心盘支承在两个转向架上，承受着作用在车体上的各种载荷。

底架由多根纵向梁、横向梁和金属地板等组成。在中间是一根截面较大并沿其纵向中心线贯通全车的中梁；两侧的纵梁称侧梁，侧墙固定在它的上面；底架两端的横向梁称缓冲梁；在转向架支承处有枕梁，它是横向梁中强度最大的梁；在两枕梁间设有若干大横梁；在中梁和侧梁间还设有若干小横梁。这些梁中以中梁和枕梁受力最大，其强度和刚度设计尤为重要。

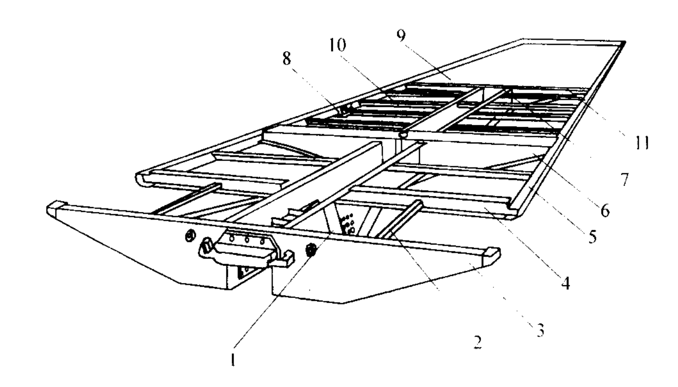


图6.8-54　22型硬座客车车体底架结构

1—斜撑；2—通过台纵梁；3—缓冲梁；4—端梁；5—下围梁；6—枕梁；7—中梁；8—顶车垫板；9—金属地板；10—小横梁；11—大横梁

整体承载车体结构具有强度高和刚度大的特点，而且蒙皮又能承担大部分载荷，所以底架的结构设计可以比一般货车的底架结构轻巧一些。甚至可以把底架中部的一段笨重中梁取消，制成无中梁的底架结构，如图6.8-55所示。图6.8-53所示的即属于底架无中梁的车体结构，其外皮采用09-MnCuPTi耐大气腐蚀的低合金高强度薄钢板。整个车体质量大为减轻。

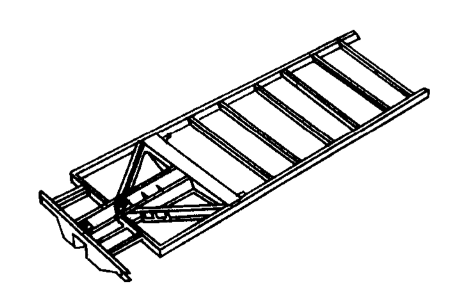


图6.8-55　无中梁底架结构的简图

4.3　侧墙焊接结构

侧墙是客车车体中面积较大的平面板架结构，它与底架、车顶等共同组成承载式的车体。它必须分担着部分载荷，故要求具有足够的强度、刚度和整体与局部稳定性。由于车体用于载客，必须在侧墙上开较多窗口；同时侧墙又是客车车体的外露部分，其外表必须平整和美观，这些都给侧墙结构设计带来困难。目前国产提速客车车体侧墙的结构设计就能满足这些要求，见图6.8-56。它由骨架和墙板（蒙皮）组成。骨架上的横梁、立柱是用钢板压制成的乙型钢，具有较大的强度和刚性，而且又便于装配与焊接。为了减小焊接变形，骨架与墙板的焊接采用塞焊和断续角焊，并采用侧墙涨拉、电磁打平工艺，以保证侧墙平整美观。

4.4　车顶焊接结构

客车车体的车顶是拱形薄壁结构，由于它与底架侧墙共同组成承载式车体，故要求车顶具有一定的强度与刚度。它主要由车顶骨架和车顶板（蒙皮）组成，见图6.8-57。车顶骨架由直梁、弯梁等组成。直梁分别由钢板压型的角钢及由钢板压型的槽钢组成；弯梁由钢板压型的乙型钢拉弯而成。钢板压型件既保证了车顶骨架的强度与刚度，又减轻了骨架的自重。骨架与车顶板采用断续焊的方式以减小焊接变形。



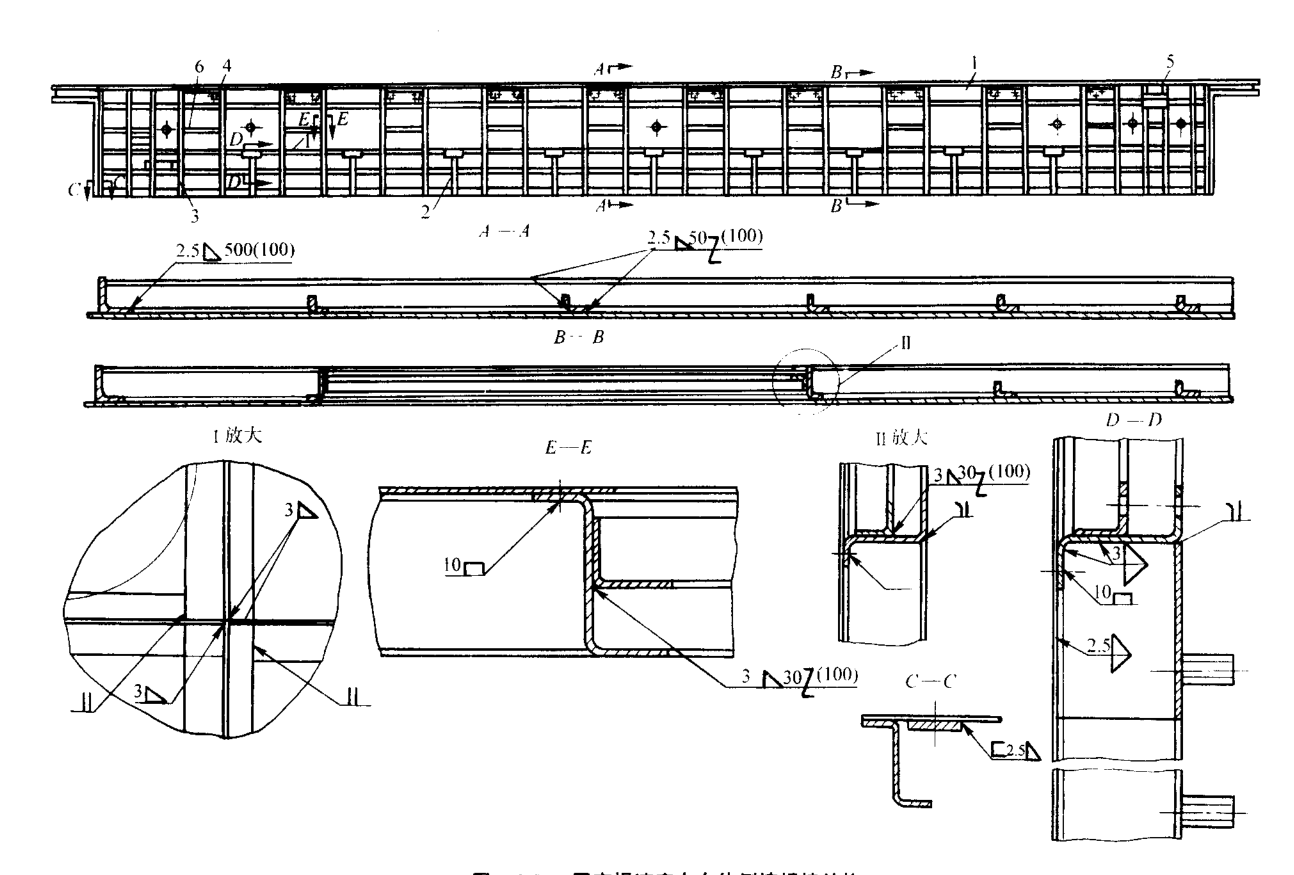


图 6.8-56 国产提速客车车体侧墙焊接结构

1—墙板组成；2—立柱组成；3—座椅安装座组成；4—行李架安装座组成；5—固定座组成；6—横梁

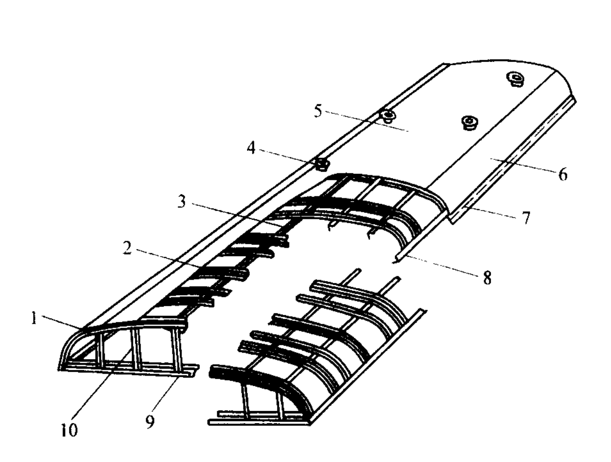
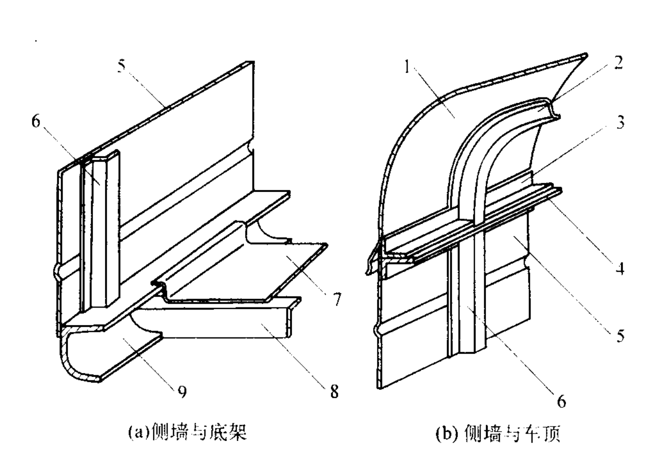


图 6.8-57 22 型硬座客车车顶结构

1—顶端弯梁；2—弯梁；3—纵梁；4—通风器突缘；5—中部顶板；6—侧顶板；7—雨檐；8—边梁；9—顶端横梁；10—车顶端立柱

4.5 侧墙与底架和车顶的连接

客车车体上的车顶、侧墙和底架等大型部件都是分别制造后再总装成整个车体，它们之间的连接结构很重要。连接处既要保证连接强度和刚性，还要结构简单以便于装配，能保证它们之间的装配精度。图 6.8-58 直观地表示它们之间的装配与连接关系。图 6.8-59 是国产提速客车车体各大部件连接的实例。



(a)侧墙与底架　(b)侧墙与车顶

图 6.8-58 侧墙与底架和车顶的连接结构

1—顶板；2—弯梁；3—车顶边梁；4—侧墙上围梁；5—侧墙板；6—侧立柱；7—金属地板；8—小横梁；9—下围梁（侧梁）



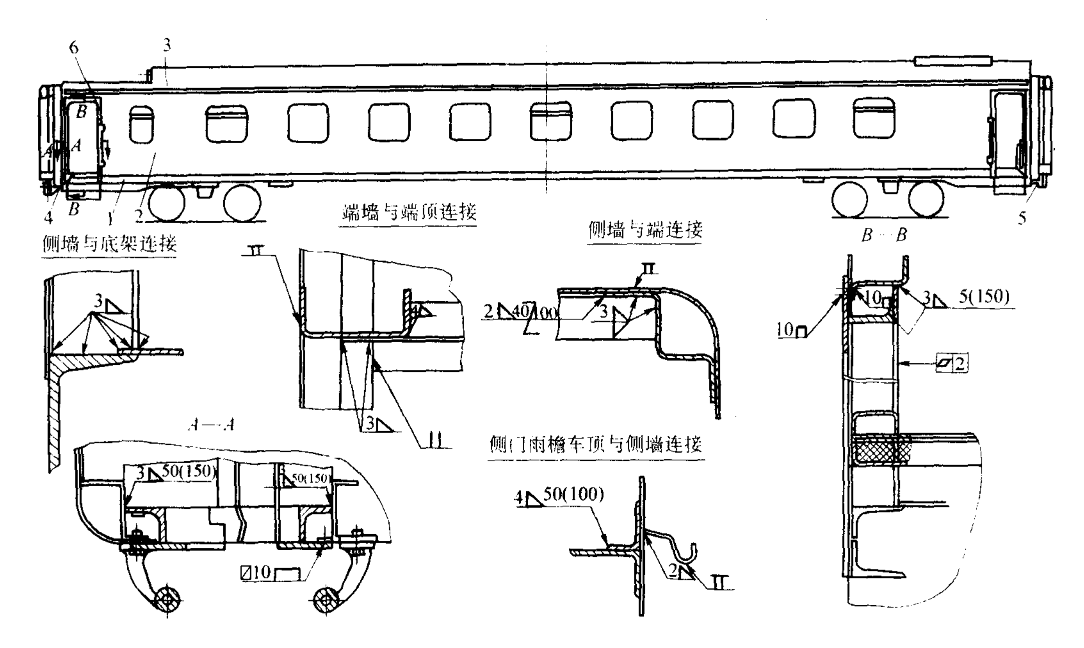


图 6.8-59 提速客车车体各部件的连接

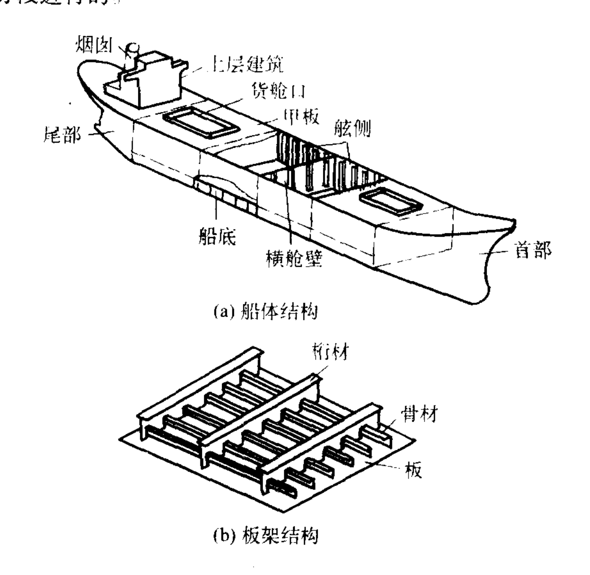
1—车底钢结构；2—侧墙钢结构；3—车顶钢结构；4—1位外端钢结构；5—2位外端结构；6—1、2位内端钢结构

5 船舶中的薄壁焊接结构

各种船舶船体的外壳，其厚度与汽车车身的外壳相比大得多，但与整个船体外形尺寸相比，仍然是薄壳，故船体结构的设计需按薄壁结构来进行。对于海上航运船舶的设计，须符合中国船级社（CCS）《钢质海船入级与建造规范》的规定。

5.1 船体结构及其特征

船体是船舶的基本部分，它又分成主体部分和上层建筑部分（图 6.8-60a），前者一般指上甲板以下部分，按纵向位置划分为首（艏）部、中（舯）部和尾（艉）部；后者位于上甲板之上，包括首楼、桥楼和尾楼。这些部分在建造时是分段进行的。



(a) 船体结构

(b) 板架结构

图 6.8-60 船体的组成及其板架结构简图

船体的主体部分是由船壳（船底及舷侧）和上甲板围成的具有流线型水密性的空心体。是保证船舶具有所需浮力、航海性能和船体强度的关键部分。一般用于布置动力装置、装载货物、储存燃油和淡水，以及布置各种舱室。为了保证船体强度、提高船舶的抗沉性和布置各种舱室，通常设置若干强固的水密横舱壁（或同时包括纵舱壁）和内底，在主体内形成一定数量的水密舱，并根据需要加设中间甲板（一层或数层）或平台，将主体水平分隔成若干层。

上层建筑是由左、右侧壁、前、后端壁和各层上甲板围成，其内部主要用于布置各种用途的舱室。上层建筑的大小、楼层和形式因船舶用途和尺寸而异。

大型船体都是用钢材制造的全焊结构。基本上是由一系列板材和骨架（合称板架结构，见图 6.8-60b）相互连接又相互支持所组成。骨架是壳板的支承结构，可增强壳板的受力条件，提高它的抗失稳能力；壳板和骨架焊在一起，也提高了骨架自身的强度和刚性。船体内的骨架沿船长和船宽两个方向布置，沿船长方向布置的称纵骨架，沿船宽方向布置的称横骨架。纵横交叉的骨架将壳板划分成许多板格，从而保证了整个板架具有很好的抗弯性能和局部稳定性。

根据板格形状，板架可分为纵骨架式、横骨架式及混合骨架式三种类型。它们的结构特征和适用范围见表 6.8-5，其工作特性和工艺性的比较见表 6.8-6。除船的艏艉部以外，按板架在船体上的位置分有甲板板架、舷侧板架、船底板架和舱壁板架等。

正是由于在船体内有需满足各种用途而设置的纵向水密舱壁、双层底、边水舱、边油舱及顶边水舱等，恰好把整个船体分隔成许多空间封闭的格子，构成一个箱格结构。即便甲板上有舱口存在，也使得整个船体具有很强的抗扭性能和总体的稳定性。图 6.8-61 所示的散装货船船体中部货舱的结构即属于这种典型。船体艏、艉部的壳体，曲面变化急剧，受力复杂，也是利用这种箱格结构来获得很好的强度、刚度、稳定性、抗振和耐冲击等性能，见图 6.8-62 和图 6.8-63。

5.2 典型板架焊接结构设计

这里通过介绍船体内几个典型板架结构，说明在大型薄壁结构设计中，如何处理好既满足用途（功能）要求，又能同时满足结构强度、刚度、稳定性和工艺性等的要求，以及如何处理好结构总体和局部之间的关系。



表 6.8-5 船体板架结构的类型及其特征

板架类型	结构特征	适用范围
纵骨架式	板架中纵向构件较密，间距小，而横向构件较稀，间距较大	大型油船的船体；大中型货船的甲板和船底；军船的船体
横骨架式	板架中横向构件较密，间距较小，而纵向构件较稀间距较大	小型船舶的船体；破冰船的舷侧；中型船舶的甲板；民船的艏艉部
混合骨架式	板架中纵、横构件的密度和间距相差不多	特种船舶的甲板和船底

表 6.8-6 纵、横骨架式板架的工作特性和工艺性

板架形式	强度	稳定性	结构重量	工艺性
纵骨架式	抗总纵弯曲的能力强，局部弯曲中纵应力较小	板的稳定性好，故板较薄时，特别是采用高强度钢板的场合，尤为有利	用于中、小型船舶能减轻船体质量	1）纵向接头多，特别是穿过水密肋板和舱壁时要增加许多补板 2）用于线形变化大的中、小型船舶，纵骨加工较困难，大合拢较麻烦 3）分段的刚性大，便于吊运
横骨架式	横向强度好，但上甲板和底部参与总纵弯曲能力较差。舷侧抗冰挤压能力较好	板的稳定性较差，尤其在较薄、初始挠度较大时	用于小型船舶能减轻船体结构性质量	施工较方便；分段的刚性较差；吊运时需作适当加强

5.2.1 船底板架焊接结构

船底板架是船体的基础。按船舶建造规范的要求，考虑船舶不同类型、尺度和用途，船底板架可设计成单底和双底等形式。而骨架布置上又有横骨架式和纵骨架式两类。

（1）单层船底板架结构

单层船底板架结构一般多用于小型船舶。图 6.8-64 为横骨架式单层板架结构，图中利用三根纵向底桁（龙骨）和许多横向肋板正交而构成网格结构，支撑着船底板并把它分隔成许多幅面小的矩形板，大大提高了船底板承受水压的能力，这对于薄壁的船底板是很必要的。通常横肋板左右连续，中内龙骨间断；也可中内龙骨连续而肋板中断。但各自必须保持在一条直线上。

（2）双层船底板架结构

双层船底板架实质上是在单层船底板架的基础上多加一层内底板，于是就把单层船底板架中的许多开式方格变成许多封闭的箱格（六面体），使得整个板架具有很强的抗弯和抗扭性能以及吸振能力。再通过一些结构措施，赋予双层船底板架结构更多功能：内层板要求水密，当外底板破损后它仍起着隔水作用，能保证船舶不致沉没；通过采用水密的底桁和水密的肋板就可获得许多储液的舱室，用来装载燃料油、润滑油及淡水等；也可作为压载舱，用于调整船舶的吃水状态，改善航行条件。

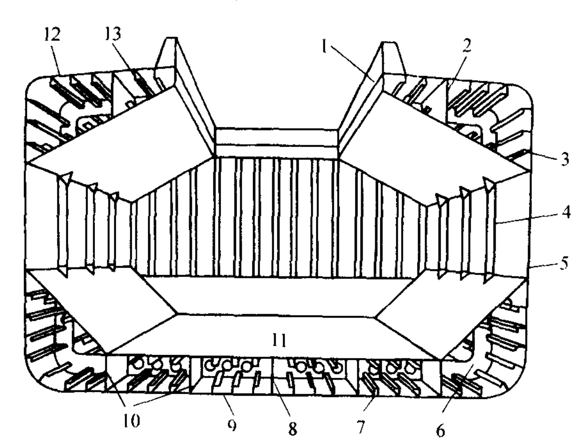


图 6.8-61 散装货船船体中部货舱区的结构（混合骨架式）
1—舱口围板；2—甲板纵桁；3—舷侧纵骨；4—肋骨；5—船侧板；6—实肋板；7—船底纵骨；8—中桁材；9—船底板；10—旁桁材；11—内底板；12—甲板板；13—甲板纵骨

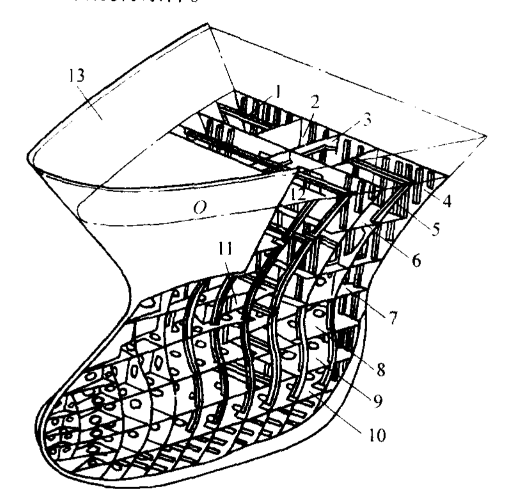


图 6.8-62 有球鼻艏的艏尖舱结构
1—横梁；2—锚链舱；3—甲板纵桁；4—横舱壁；5—肋骨；6—艏尖舱平台；7、8、9、10—水平隔板；11—制荡隔板；12—上甲板；13—首楼甲板

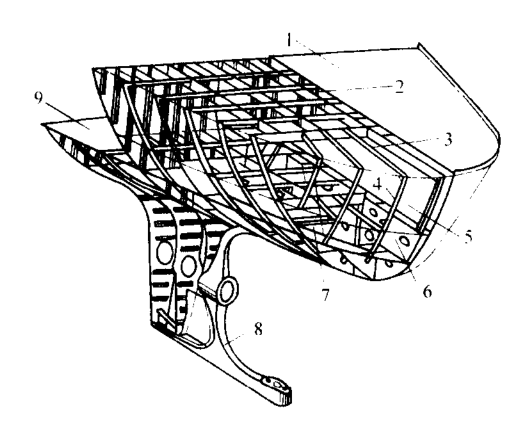
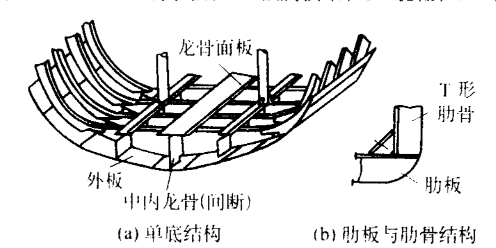


图 6.8-63 艉部结构

1—上甲板；2—甲板桁材；3—斜横梁；4—斜肋骨；5—舵机舱平台；6—制水板；7—强胸横梁；8—艉柱；9—下甲板



(a) 单底结构　　(b) 肋板与肋骨结构

图 6.8-64 单层船底板架结构

双层底板架内按骨架的布置也分横骨架式和纵骨架式两类。前者多用于海洋客船、小型货船及内河客船等，后者多用于大中型船舶。

1）横骨架式双层底结构　主要由船底纵桁、内底板及多种形式的肋板组成，见图 6.8-65。

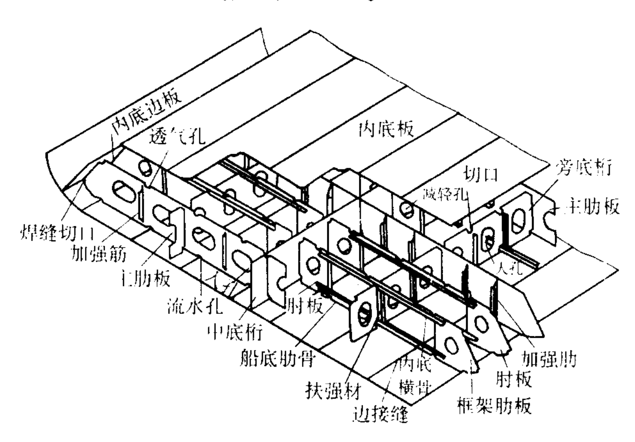


图 6.8-65 横骨架式双层底板架结构

在横骨架式双层底板架中的构件多沿横向安排，而纵向构件则较少。其主要纵向构件中底桁须在横舱壁之间保持连续，同时在船中 0.75L（L 为船长）区域内还应要求水密，它的高度一般不应低于 700 mm，以便于内部施工；旁底桁起联系肋板的作用，只在两道主肋板间保持连续，且无水密要求。它的设置随船宽而定，要求与中底桁及舷侧的间距均不得超过 3 m，且对称船体中心线布置；横向构件主要是水密肋板和主肋板，要求自舷侧至中底桁为连续。水密肋板是根据双层底的分舱要求而设置，一般都布置在横舱壁处。装载时水密肋板可能处在单面受压状态，为防止失稳除适当增加板的厚度外，尚需设置垂直加强肋，加强肋的间距不得大于 900 mm；主肋板由钢板切成，其上开有人孔、流水孔、透气孔和焊接切口等。可以在每档肋位设置一主肋板以提高船底结构的横向强度，但船重增加。也可每隔 2～4 档距设置一主肋板，中间肋位则设置组合肋板。所有与肋板周边相连的构件的角焊缝，必须焊接牢固。

2）纵骨架式双层底结构　主要由内外底纵骨、底纵桁和肋板等组成，见图 6.8-66。

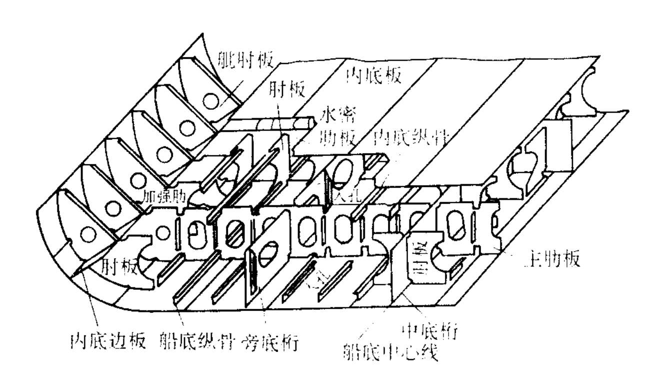


图 6.8-66 纵骨架式双层底结构

在纵骨架式双层底结构中底桁和若干根旁底桁贯穿横舱壁，同时在内外底板上配置较密的纵骨以提高总强度。纵骨一般用轧制型钢（不等边角钢、球扁钢）或 T 形组合材。与内、外底板的连接须采用双面连续角焊缝。其横向构件则为主肋板和水密板。旁底桁在船舯区域应平行船体中心线布置，至艏艉区域因船宽减小应改为折线形布置，并将旁底桁的数目逐渐减少。其折点应设置于横舱壁或强肋板处，在同一肋位上中断的旁底桁数目不应多于两根，且在中断处的横舱壁或强肋板的另一侧，应设置延伸肘板，其延伸长度不得小于两档肋距。通常主肋板间距不大于 2.5～3 m，机舱区域应每隔 2 档肋距设一主肋板其余受力大的地方也应设置。它是内外底纵骨的刚性支座，因此除应开孔让纵骨穿过外，还应与纵骨焊接。水密肋板的设置与横骨架式双层底结构相同。纵骨在船舯区域的布置应与中底桁平行，近艉区域，纵骨的数目随船宽减小而减少，但不允许在同一肋位处有较多的纵骨中断。最常用的纵骨为球扁钢，习惯上将球扁钢的凸缘朝向船体中心线，且沿船宽方向应均匀布置。但邻近中底桁的球扁钢凸缘须背向中心线，以利于安装中底桁两侧的肘板。

5.2.2 舷侧板架焊接结构

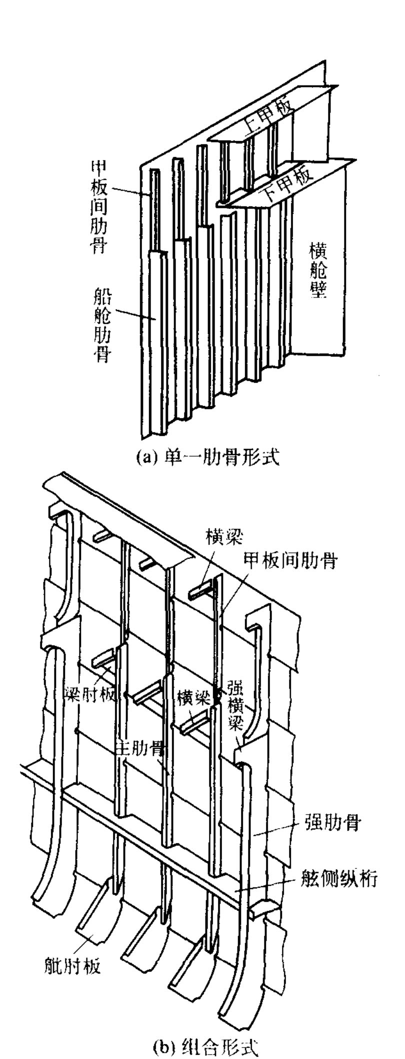
舷侧板架结构也分横骨架式和纵骨架式，根据需要也可设计成单层壁和双层壁的结构。舷侧上的横向骨架是船体横向框架的组成部分，与外板一起形成船体的侧面壳体，用以承受舷外的水压力、冰块挤压力、波浪冲击力及舱内货物的横向压力等。船体的侧面壳体又是传递作用于甲板和船底上的外力的重要结构，同时还增强了船体的抗扭刚度。大部分船体都是采用单层舷侧结构，只有甲板上有大开口的船舶，如集装箱船和分节驳船等采用双层舷侧结构。

（1）横骨架式舷侧结构

横骨架式舷侧结构一般用于干货船、散装货船、中小型油船及大多数小型船舶上。根据其中肋骨的布置方式又分两类：一类是单一肋骨的形式（图 6.8-67a）；另一类是除普通肋骨（又称主肋骨）外，还设有强肋骨和舷侧纵桁的组合形式（图 6.8-67b）。两者选择与舱位有关，如干货船的货舱、煤舱等多采用单一肋骨的舷侧结构，以利于增加舱内容积；油船较多采用组合形式的结构。

舷侧板架与甲板板架及舷侧板架与船底板架之间的连接相当重要，通常是舷侧板架的肋骨与甲板板架的横梁用肘板进行连接，而与船底板架的肋板用舭肘板进行连接，使之形成坚固的横向框架，以保证船体的横向强度。





(a) 单一肋骨形式

(b) 组合形式

图 6.8-67　横骨架式舷侧结构

散装货船都是单层甲板，并在舷侧的上下部位设置有边水舱。此类船舶的舷侧一般采用单一肋骨，其连接形式较简单，只在肋骨的上下端用肘板分别与顶边水舱和底边水舱连接，见图 6.8-68 所示。

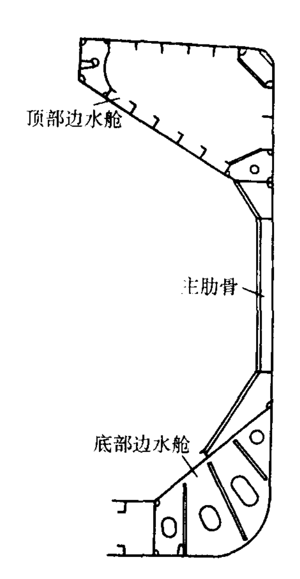


图 6.8-68　散装货船舷侧肋骨连接形式

(2) 纵骨架式舷侧结构

纵骨架式舷侧结构一般用于舰艇和油船上，用以提高船体的总纵强度和抗失稳能力。图 6.8-69 所示为有边油舱的纵骨架式舷侧结构，除了纵骨和强肋骨外，还设置有水平撑杆。

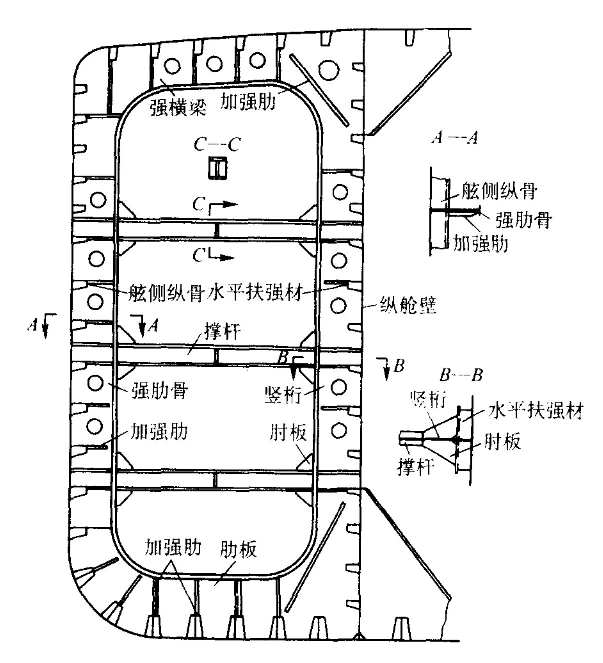


图 6.8-69　纵骨架式油船边油舱结构

舷侧纵骨一般都用球扁钢制成，其间距通常和船底的纵骨间距取成一致，或取得稍大一些。它除参与船体总纵弯曲、保证外板的稳定性外，还起到支持外板承受舷外水压力的作用，因此舷侧不同高度处的纵骨尺寸各不相同，近船底的纵骨尺寸较大，而舷侧上部的纵骨尺寸可小些。

强肋骨是保证舷侧横向强度的重要构件，同时起着支承纵骨的作用，使纵骨尺寸得以减小。它应与强横梁、纵舱壁上的竖桁材以及船底肋板等布置在同一剖面上，以组成坚固的横向框架。强肋骨的腹板应开切口以便纵骨穿过，并增设肋板将两者连接起来。

撑杆的作用主要是将舷侧和纵舱壁联系起来，因此必须设置在强骨架上并需具有足够的截面积和轴向稳定性。考虑到油类有膨胀的特性，不能采用封闭的管材作撑杆，常用开口式截面的组合型材。

5.2.3　甲板板架焊接结构

甲板将船体划分成层次结构，上甲板（又称强力甲板）是船体抗纵总弯曲的强力构件。上面用以布置舱面建筑，下面用以布置货舱、油舱及机舱等。货船的甲板上都有大的开口，结构比较复杂。甲板板架也分横骨架式和纵骨架式两种（图 6.8-70）。前者多用于小型船舶的上甲板，后者多用于大中型货船的上甲板，但舱口间甲板也有采用横骨架式的。中间甲板和下甲板则多采用横骨架式，散货船货舱区的甲板包括在顶边水舱中，通常采用纵骨架式结构（图 6.8-68）。横骨架式的横梁和纵骨架式的强横梁都应配合舷侧的肋骨而设置，以组成肋骨框架。板架中的横向构件主要承受横向载荷，而纵向构件除承受横向载荷外，尚需承受船体的总纵弯曲。

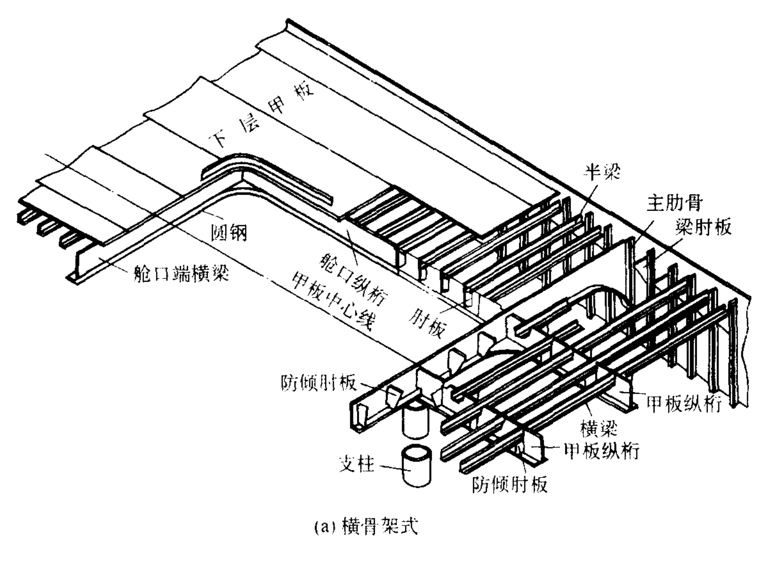
(1) 横骨架式甲板结构

横骨架式甲板结构由甲板横梁、半梁、舱口端梁和甲板纵桁等组成，内河船舶有时还设有强横梁。

甲板横梁从一舷贯通到另一舷，它除了支持甲板上的各种载荷外还起着支撑舷侧的作用，并与肋骨、肋板等组成框



架以抵抗船体的横向变形。舱口区域内的横梁在舱口纵桁处间断，称为半梁。横梁一般由不等边角钢或球扁钢制成。



(a) 横骨架式

(b) 纵骨架式

图 6.8-70　甲板板架结构

舱口端梁是指货舱口前后端的强横梁，它与甲板上的舱口围板设置在同一横剖面上。多为T形组合型材，但到舱口区域时应过渡成L形，并在L形的交角处焊上圆钢，以减轻装卸绳索的磨损。

甲板纵桁在横骨架式甲板结构中起支承横梁的作用，故在腹板上应开有让横梁穿过的切口。甲板纵桁腹板的高度不得小于所开横梁切口高度的1.6倍，而腹板厚度应不小于本身高度的1%加4mm。甲板纵桁通常在横舱壁处间断，利用肘板或是加大间断处的纵桁腹板尺寸而与横舱壁连接。甲板纵桁为T形组合型材，但在舱口区域的甲板纵桁应由T形过渡到L形，并在交角处焊上圆钢。

横梁与肋骨必须利用肘板连接起来，才能起到相互传递应力的作用，并保证节点处的强度和刚度。

(2) 纵骨架式甲板结构

纵骨架式甲板结构由甲板纵骨、甲板纵桁和强横梁等组成，在货舱口区域内的甲板常设计成横骨架式结构。

甲板纵骨由球扁钢或不等边角钢制成，与船体中心线相平行布置。甲板纵桁在遇到横舱壁时，一般都采取间断，并在舱壁两侧用肘板连接起来。而舰艇结构则多在舱壁上开口，让纵桁穿过来保持其连续性，此时舱壁上必须设置水密补板，将切口密封。

强横梁在纵骨架式甲板结构中，通常每隔若干肋距设一强横梁，用以支承纵骨和保证船体的横向强度和刚度。横强梁的腹板上应开有让纵骨穿过的切口，其腹板的高度不得小于所开切口高度的1.6倍，厚度不得小于本身高度的1%加4 mm。

甲板纵骨与横舱壁的连接有两种形式：一是纵骨在横舱壁处间断，用肘板与舱壁连接起来；另一是纵骨穿过横舱壁。前者便于施工，但纵骨的连续性较差，一般用于中小型船舶；后者施工比较复杂，对加工与装配要求较严，一般在大型船舶中采用。强横梁与舷侧肋骨应采用肘板进行连接。甲板纵桁一般在横舱壁处间断，或增设肘板，或是将纵桁腹板高度放大以代替肘板，将其连接在横舱壁上。有时为了纵桁的连续性也可在横舱壁上开口让纵桁穿过，其措施与纵骨穿过横舱壁的形式相同。

(3) 舱口结构

货船必须有舱口，因而需在甲板上开口，这就破坏了甲板结构的连续性。当船舶总弯曲时，由于甲板在开口处的净面积的损失，将出现严重的应力集中。对开矩形口的最大应力位于开口的角隅处。图6.8-71是矩形开口应力集中系数

与开口几何尺寸之间的关系。从图中看出，角隅处的最大应力集中系数 k 随着开口边的长宽比 a/b 的增大而降低。因此，设计开口时，应将开口的长边沿船长方向布置；随着角隅处的圆弧半径与开口宽度之比 r/b 减小，应力集中系数变大，反之，则变小。通常取 $r/b=0.1\sim0.2$ 之间。

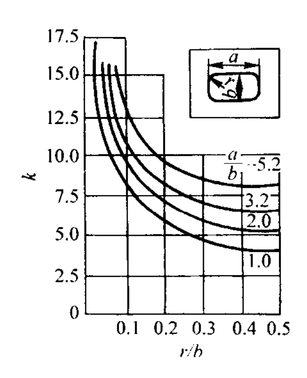


图 6.8-71 矩形开口的应力集中系数

在开口角隅处有应力集中，须加强。加强的方式有两种：一是采用复板，即在开口角隅处的甲板上叠一块小板；另一是采用较厚的钢板来代替开口角处的甲板。前一方式常在小型船舶中使用，后一方式多在中、大型船舶中应用。图 6.8-72 示出这两种方式的加强。

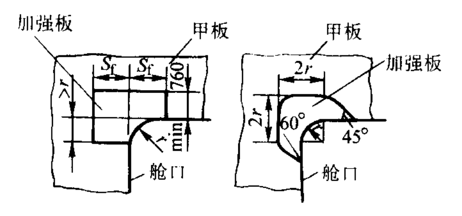


图 6.8-72 舱口角隅处的加强方式

露天强力甲板货舱口都设置有较高的舱口围板，以防止雨水浸入舱内，这时舱口的设计需综合考虑。图 6.8-73 示出了两种舱口围板结构：图 6.8-73a 是将舱口围板伸至甲板以下，并使角隅处的舱口围板也弯成圆弧形，甲板开口的四周都要用连续焊与舱口围板焊接。此种结构形式可改善角隅处的应力集中，但安装舱口端梁和舱口纵桁较麻烦；图 6.8-73b 是甲板开口角隅仍设计成圆弧形，舱口围板直接焊在甲板上，并与甲板下面的舱口纵桁和端梁分别对应，舱口端梁和纵桁相交处的面板采用一块加厚的菱形板来代替。连接舱口端梁和舱口纵桁的菱形板，其厚度约为两者中较厚的翼板的 1.25～1.5 倍。

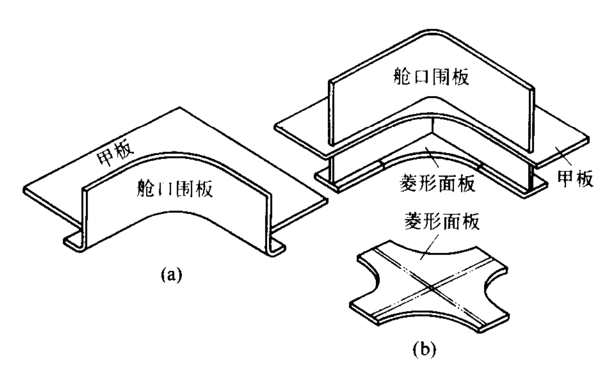


图 6.8-73 舱口角隅围板结构

如果开口的尺寸相对于船宽很小，或甲板上的实际应力值很低，且其最大值不超过许用应力值时，这类开口一般可不予加强。

5.2.4 舱壁焊接结构

舱壁的功能：一是将船体分隔成各种不同用途的舱室，二是保证船舶在一舱或多舱进水时不致沉没，三是可防止舱内的火灾蔓延和有害气体的扩散。舱壁设置的数量和间距，应根据舱室布置和抗沉性要求来确定。舱壁按它的船体中的设置方向，可分为横舱壁和纵舱壁两类；按其用途可分为水密舱壁、轻型舱壁和防火舱壁等；按其结构形式分则有平面舱壁和槽形舱壁。

（1）平面舱壁

平面舱壁是由舱壁板和骨架两部分组成。这类舱壁应用最多，如大中型油船的纵舱壁多采用这种平面舱壁，因为总纵弯曲应力较大，若用槽形舱壁则在槽体角隅处易因应力集中而产生裂纹。而且安装和施工也比槽形舱壁省事。图 6.8-74 为平面舱壁的结构。

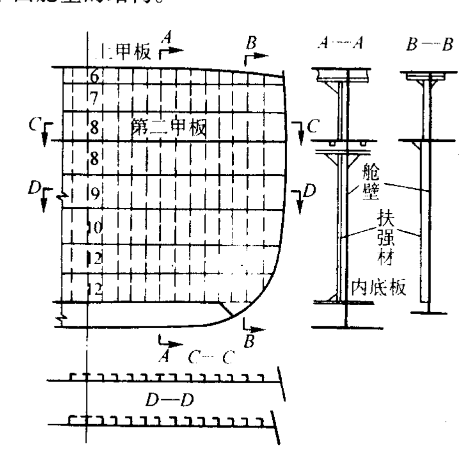


图 6.8-74 平面舱壁结构

1）舱壁板 是由一些钢板拼接而成，其形状即为舱壁所在肋位的船体横剖面形状（横舱壁），或所在纵剖面的船体甲板层形状（纵舱壁）。钢板的布置通常由下而上排列，钢板的长边顺着船宽方向。其优点是各列板可取不同的厚度，即对舱壁下端易受腐蚀的列板或受水压力较大的列板取得厚些，位于其上的列板随着深度的减小而取得薄一些，但最下一列板厚不得小于 5.5 mm。对于深度不大的小型船舶及货船的甲板间舱壁和艏艉部舱壁，因其高度不大，壁板多采用垂直方式来布置钢板，以便于施工和节省钢材。

2）舱壁骨架 舱壁幅面大、易失稳，需利用骨架分隔幅面，以增大其刚度和稳定性。骨架由扶强材和桁材组成，前者一般采用不等边角钢，后者一般采用 T 形组合型材。桁材用以支持扶强材，减小扶强材的计算跨距，但桁材尺寸较大影响舱内容积，故一般干货船的横舱壁都不设置桁材，宁可适当增大扶强材的尺寸，以免损失舱容。横舱壁上的扶强材，其间隔一般在 600～900 mm 之间，均匀布置在横舱壁上并与船底和甲板上的纵向构件对准。位于甲板纵桁下的舱壁扶强材，应加大尺寸使之起着支承作用。扶强材只安装在舱壁板的一侧，习惯上安装在舱壁面向船艏的一侧。扶强材的凸缘习惯上朝向船体中心线安装。对于狭窄的舱壁，因其高度远大于宽度，且舱壁左右舷方向受力较大，此时允许扶强材按水平方向布置，桁材则按垂直方向布置。

桁材起着支持扶强材的作用，除应在其腹板上开口让扶强材穿过外，还应将两者焊接牢固，并在腹板的下侧设置防倾肘板和加强筋，以增强桁材腹板的刚性。

（2）槽形舱壁

槽形舱壁是由钢板压制而成。舱壁呈凹凸的曲折形状，曲折的槽起着扶强材的作用，增加舱壁的刚性和稳定性，减少焊接工作量。油船货油舱的横舱壁大都采用槽形舱壁结



构。图6.8-75所示即为这种结构的典型。

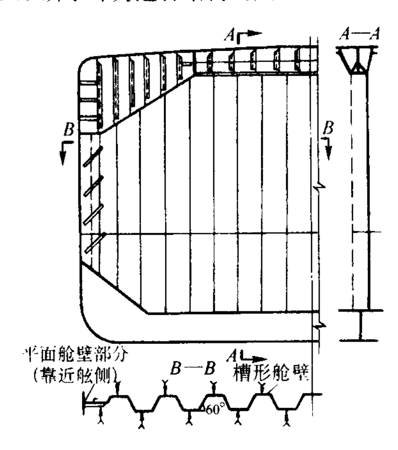


图6.8-75　槽形舱壁结构

槽形舱壁的截面形状一般有如图6.8-76所示的几种，梯形和矩形主要用于万吨级以上的船舶，弧形和三角形多用于小船和上层建筑。目前水密舱壁以梯形剖面应用最广。壁厚同平面舱壁须计算确定，但不得小于5.5 mm。槽体愈深，强度和刚度愈大，但不省材，需经综合分析后选定。

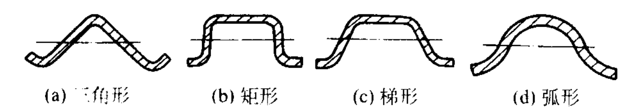


图6.8-76　槽形舱壁的截面形状

槽形舱壁在垂直于槽体方向的承压能力较差，而顺着槽体方向的承压能力则较强，故在布置舱壁的槽体方向时，应结合船体受力条件来考虑。如油船上的纵舱壁因参加总纵弯曲，槽体常采取纵向水平布置。这时在肋板处舱壁于边油舱一侧设竖桁，以增加舱壁的刚性。竖桁的腹板上割出与舱壁槽体相应的槽口，插入槽体后焊接连接。舱壁的上下端各设一行平面舱壁板，其上设水平加强肋。舱壁与甲板和船底板采用角接（见图6.8-77）。

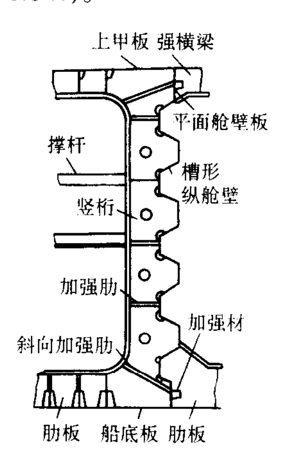


图6.8-77　油船槽形纵舱壁结构

图6.8-78是槽形舱壁端部的连接形式。图6.8-78a是端部直接与船底或甲板焊接，再用肘板与邻近结构的骨材连接。这种连接形式使肘板大小不一，结构性参差不齐。图6.8-78b和图6.8-78c是带有凳式结构的连接方式，是T形的组合结构。槽形舱壁可直接与T形结构的面板连接，这样给槽形舱壁的安装带来很大方便。

当槽形舱壁的槽体垂直布置时，靠近舷侧的部分舱壁应改为平面舱壁，否则会使舱壁的划线和切割工作变得甚为复杂。部分平面舱壁上应设置垂直扶强材，另一侧增设斜放的加强肋（见图6.8-75）。

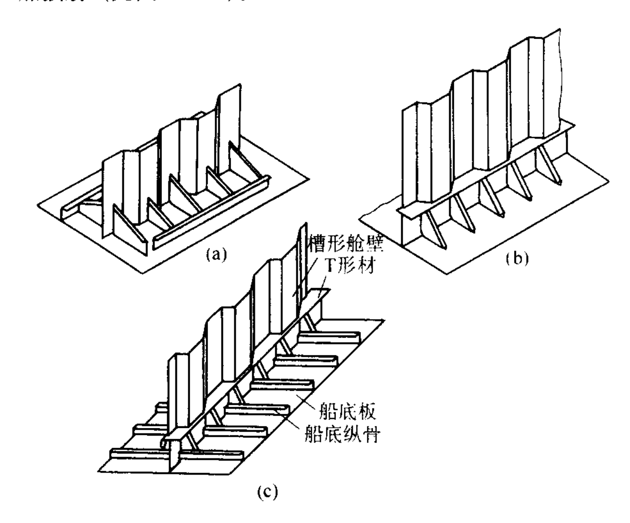


图6.8-78　槽形舱壁端部的连接形式

对纵骨架式的船体，常将槽形舱壁的四周都设计成凳式结构，以构成框架，使整个槽形舱壁嵌接在框架的面板上，如图6.8-79所示。

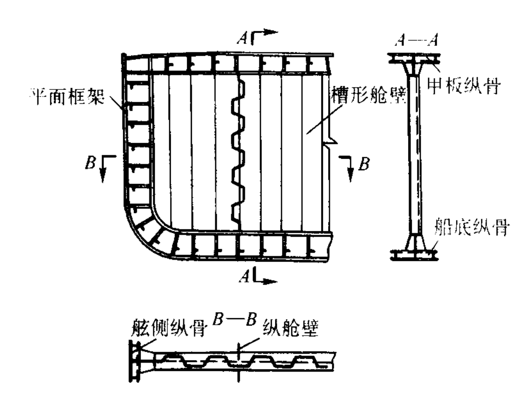


图6.8-79　加装框架的槽形舱壁结构

6　水利工程中的薄壁焊接结构

在水利水电工程中水工钢闸门是典型的薄壁焊接结构。其门叶部分是由幅面很大的挡水面板与支承它的梁格结构焊接而成。本节介绍两个典型闸门的结构例子，以说明薄壁焊接结构在水利水电工程中的实际应用。

6.1　水工闸门简介

水工闸门是用于封闭水工建筑的孔口，以调节水位与泄放流量。

水工闸门的类型甚多。若按工作性质分则有工作闸门、事故闸门、检修闸门和施工闸门等；若按制造闸门材料分则有钢闸门、铸铁闸门、木闸门和混凝土闸门。大、中型闸门多为钢制闸门，且用焊接方法来制造；若按构造特征分则有平面形闸门、弧形闸门、扇形闸门、屋顶形闸门等等。闸门的设置决定于用途、位置、孔口尺寸、水力学条件、运行方式以及运行和检修有关的要求等。

图6.8-80是目前我国最大的三峡枢纽工程泄洪坝段所设置的闸门及其启闭设备。从图中看出，闸门通常由下列三部分组成。

1）活动部分　它是既能关闭孔口，又能开放孔口的堵塞体，一般称门叶结构或门体。闸门焊接结构指的就是这一



部分，是本节介绍对象。

2）埋设部分　埋固在土建结构中的构件，如支承行走机构轨道等，通过这些构件把活动部分所承受的载荷（含自重）传给土建结构；

3）启闭机械　是控制活动部分位置的操作机构，如门式提升机、液压启闭机等。

各类闸门中，平面闸门可以满足各种类型泄水孔道的需要，且具有制造简单，安装、运行、维护方便，抗振性能较好，水力学条件不突出（在水头不高的闸门中），运行的适应性比较强，闸墩短等优点。故是当前我国应用最广泛的一种。这类闸门又可按闸门启闭方式不同而细分，如直升式闸门、横拉式闸门、横轴转动式的卧倒闸门、竖轴转动式的人字闸门等。

弧形闸门与平面闸门相比较，具有启闭力小、比较稳定、闸槽没有凹槽、水流流态好、水力学条件优越、运用灵活等特点。因此，它也是被广泛应用的闸门之一。

我国钢制闸门的设计须符合水利部颁发的《水利水电工程钢闸门设计规范》（SL74—95）的规定。

焊接闸门所用的钢材，应按闸门的性质、操作条件、连接方式、工作温度等不同情况选择。一般可采用平炉或氧气转炉的 Q235、16Mn、16Mnq 等钢材。其抗拉强度、屈服点、伸长率和硫、磷含量须合乎相关标准要求，并满足焊接性的要求。

常用中、小型闸门，如平面闸门、弧形闸门和人字闸门的结构布置近乎定型，目前采用平面体系分析和许用应力方法进行设计计算。但对于大孔口、高水头闸门计算结果有较大误差。近年来有限单元法的广泛应用，使闸门按空间体系分析方法逐步得到推广。将来还会逐步过渡到以概率理论为基础的极限状态设计验算方法。

我国建造水工闸门的技术基本上达到了国际同类设备的水平，如闸门的最大孔口面积达 437 m^2，挡水水头和操作水头分别达到 140 m 和 105 m，深孔弧形门的最大总水压力达 87 350 kN 等。随着三峡枢纽工程建成，我国在钢制闸门的设计与制造技术水平上将跃居世界前列。

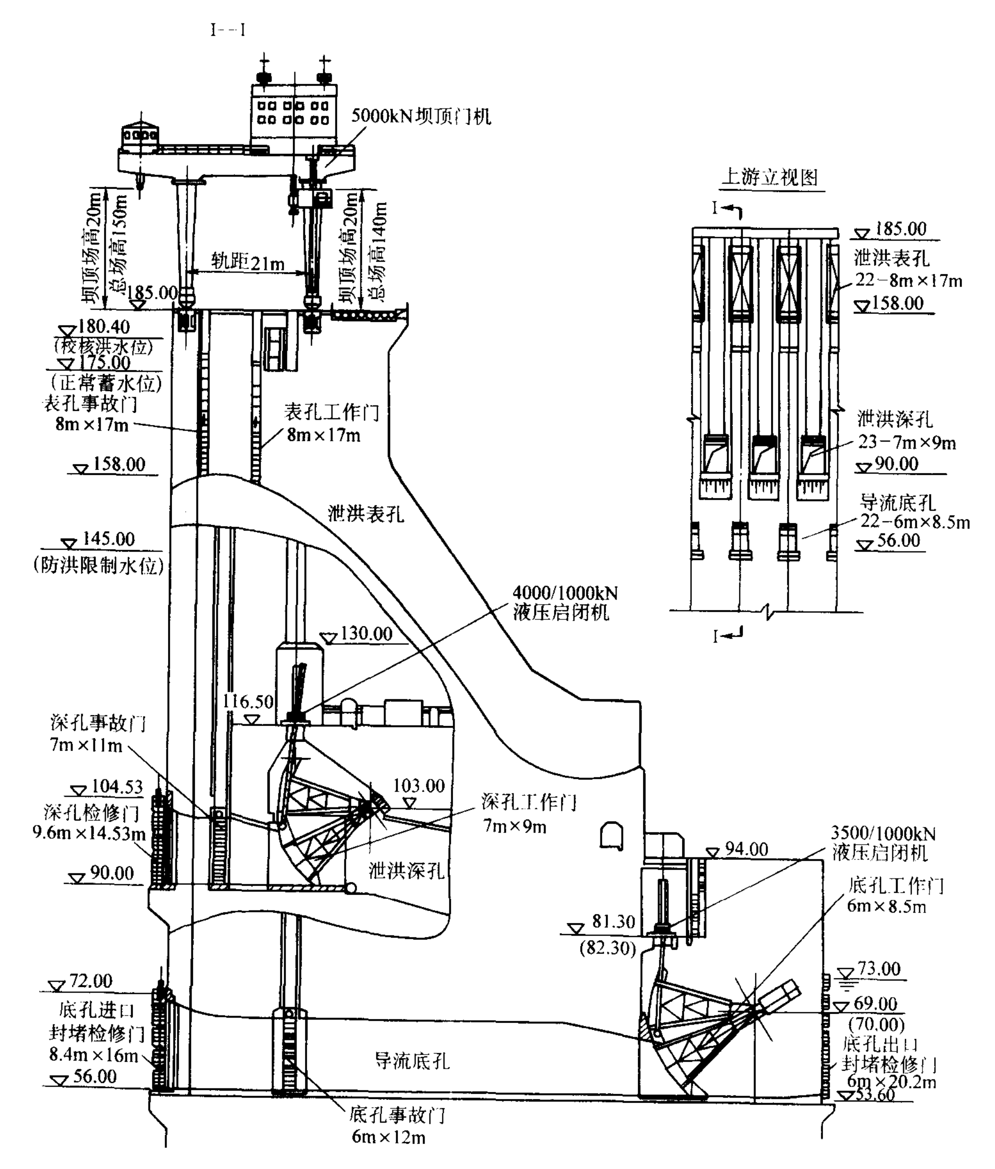


图 6.8-80　三峡枢纽工程泄洪坝段配置的闸门



6.2 闸门的工作特点及其结构特征

6.2.1 闸门的工作特点

闸门的基本功能是挡水和放水。直接挡水的是闸门的面板，面板承受着垂直板面的水压力。该水压力随着水头增大而增大。平板受垂直载荷必然发生弯曲，其抗弯强度和刚度决定于面板的形状尺寸和边界条件。从前面 1.1.1 所述，对于周边固定的矩形平板，当受垂直均布载荷时，其支承长边中点的弯曲应力最大，其值与水压力成正比，与支承短边宽度的平方成正比，与平板厚度平方成反比。它必须小于钢材的许用应力。要降低平板的弯曲应力，最合理也最有效的结构措施是减小支承边之间的间距（宽度）。也就是在面板的下游面焊接上水平和垂直的梁，以此梁系作为支承，把整块挡水面板分隔成许多幅面更小的周边固支的矩形板。图 6.8-81 所示为闸门面板被梁系分隔的三种形式。若在图 6.8-81 a 的基础上增加垂直次梁（纵梁）作支承，该面板的幅面便被隔小，如图 6.8-81 b。若再增加水平次梁作支承，如图 6.8-81 c，则幅面被分隔得更小。当面板材料已选定，则面板的厚度就可以随着矩形板幅面的减小而选得很薄。面板上承受的水压力就通过梁系传递到土建结构上。

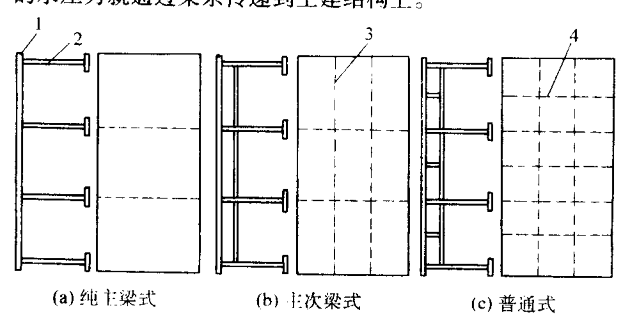


图 6.8-81　闸门面板被梁系的分隔

1—面板；2—主梁；3—垂直次梁；4—水平次梁

6.2.2 闸门的结构特征

闸门门叶结构的基本特点是面板加梁系，它们的构造各有特点。

（1）面板

面板是闸门结构中的薄壳，但却是一个主要承载构件。不能透水，与梁系焊接在一起，就能参与闸门整体工作，通常面板制成平面或曲率很小的弧面。

闸门面板由焊接引起的变形，一般是顺着水流方向朝内弯曲的，如图 6.8-82 所示虚线位置。考虑闸门的工作条件，其最大变形值 $\frac{\Delta}{l} \approx \frac{1}{500} \sim \frac{1}{700}$。当次梁采用角钢时，其安放位置应朝下放（图 6.8-82），以免积水；对于采用单腹板的焊接组合梁则应考虑在腹板上开流水孔。

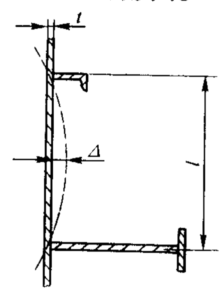


图 6.8-82　闸门面板变形图

面板的纵向或横向拼缝位置，避免布置在闸门跨中。

面板在整个闸门结构质量中占较大比重。减小面板的厚度对减轻闸门自重和节约钢材有着重大意义。对于大孔口，高水头的闸门，一般面板采用等强度面板结构，即面板从上而下逐渐增厚，主横梁的间距也相应缩小。因此，合理设计梁系尺寸（即合理布置水平和垂直梁的数量和位置）成为关键。

（2）梁系

梁系包括主梁、边梁、水平次梁和垂直次梁等，它们的布置和连接不仅关系到整个门叶的强度、刚度和稳定性，而且还关系到材料消耗和施工难易等方面。大致有下列两种布置形式。

1）同层布置（图 6.8-83）梁系同层布置是指主、次梁的前翼缘均紧贴面板。这种连接形式，梁系与面板形成刚强的整体，整体刚度好；面板为四边支承，受力条件好。其缺点是水平、垂直次梁相遇时两者需断开一方，垂直次梁遇横主梁时也需断开，因此，制造费工。目前实腹梁式主梁的闸门中多数采用同层布置，并使用实腹式隔板兼作垂直次梁。这样可在隔板上开孔，使水平次梁直接穿过。简化了梁系接头的构造和制造工艺。

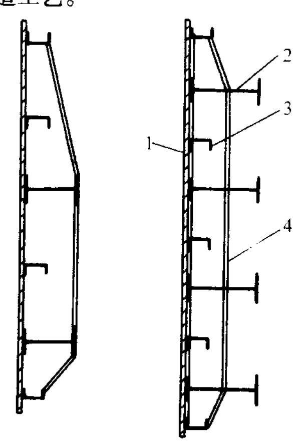


图 6.8-83　梁系同层布置

1—面板；2—主梁；3—水平次梁；4—垂直次梁

2）叠层布置（图 6.8-84）叠层布置有主、次梁叠层和水平、垂直次梁互相叠层之分，前者是指主梁前翼缘不紧贴面板、而叠接在次梁上。其荷载传递特点是面板→次梁→主梁，整个传递过程受力比较明确，但整体刚度不如同层布置那样好；面板视次梁具体布置可作为四边或两边支承来计算。通常是为了使梁系受力明确和制造加工简便而采用叠层布置。

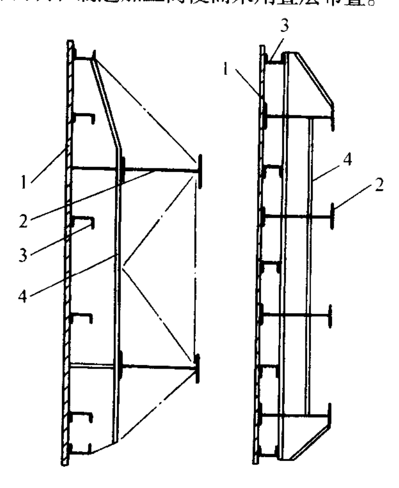


图 6.8-84　梁系叠层布置

1—面板；2—主梁；3—水平次梁；4—垂直次梁

（3）梁的结构

梁一般按跨度和载荷情况而采用实腹式或桁架式。

1）实腹梁　应用最多，一般有型钢和组合两种梁型。

型钢梁常用于小型闸门的主梁或大、中型闸门上的水平次梁，具有不受焊接变形影响、加快施工进度等优点。

组合梁是由钢板或型钢焊接而成。一般是在梁的载荷增大、型钢截面尺寸不能满足要求时才采用。由于它具有设计上的灵活性，故在大、中型闸门上普遍用作主梁和边梁。跨度较大时，可采用变截面的结构形式。组合梁的高度应根据刚度条件确定。根据梁的整体和局部稳定性的需要，可用纵向或横向肋板对梁进行加强。组合梁的拼接缝、翼缘板与腹板连接的焊缝应进行强度验算，考虑到闸门的浸水工况，一般采用连续焊缝。

箱形梁在闸门结构中也有采用，因它外形封闭，具有一定浮力，能减轻启门力。此外，可以获得较高的抗弯和抗扭刚度。如图 6.8-85 所示的箱形梁，焊接时，在上游方向翼缘板的角焊缝承受压力，宜布置 4 条焊缝从内外先施焊，另一侧翼缘板上，只需两条角焊缝在腹板外部施焊。此外，还应保证其两端封板焊缝的水密性，以防水漏入梁体内。

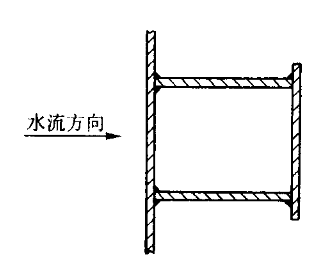
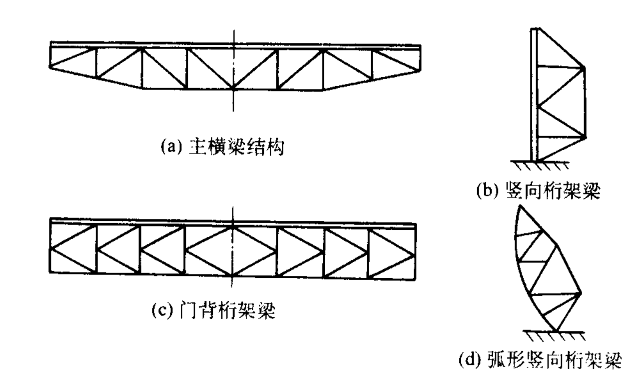


图 6.8-85 箱形梁焊缝设置

2）桁架梁 常在低水头、大跨度的闸门结构中采用，以减轻质量和节约钢材。图 6.8-86 示出闸门常用的桁架梁的结构形式。桁架杆件截面和节点设计同本篇第 4 章桁架部分。



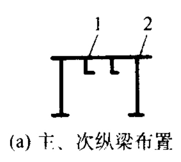
(a) 主横梁结构　(b) 竖向桁架梁　(c) 门背桁架梁　(d) 弧形竖向桁架梁

图 6.8-86 水工闸门桁架梁的常用结构

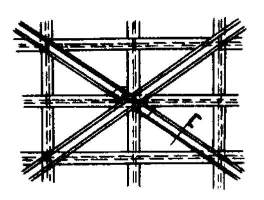
3）纵梁 纵梁在水工闸门结构设计中其构造特征是垂直布置（图 6.8-87a）。其中次纵梁（又称垂直次梁）可减小面板的区格尺寸；主（或强）纵梁则保证闸门整体刚度而设置的，其结构形式通常有实腹式和桁架式两种。如闸门需设置吊点装置，则可结合主纵梁的设计，使兼作起重杆件之用。次纵梁的角焊缝可按最小焊脚尺寸确定，而主纵梁的焊缝应进行计算。

小跨度闸门一般采用空腹式门背结构，见图 6.8-87c，大跨度闸门需在背面增设斜拉杆，见图 6.8-87b，以增强闸门整体刚度，减小起吊时和运行过程中的变形和扭转变位。

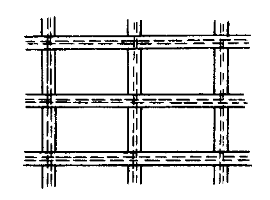
4）边梁 边梁也是垂直放置，它因布置在门叶两边而得名。承受由面板、主横梁等传递来的内力，最后传到支承部分。因此，应具有足够的强度和刚度。



(a) 主、次纵梁布置



(b) 斜杆式门背结构



(c) 空腹式门背结构

图 6.8-87 纵梁的布置

1—次纵梁；2—强纵梁

6.3 闸门结构设计的基本要求

闸门的结构计算应按照实际可能发生的最不利的载荷组合情况，对闸门设计条件和校核条件进行强度、刚度和稳定性验算。

强度验算时，对于闸门承重构件和连接件，应验算正应力和剪应力。在同时受较大正应力和剪应力作用处，尚应验算折算应力。计算的最大应力值不得超过允许应力的 5%。

对弧形闸门的纵向梁系和面板，可忽略其曲率影响，近似按直梁和平板进行验算。

刚度验算时，应验算受弯构件的挠度。最大挠度与计算跨度之比，不应超过下列数值。

1）潜孔式工作闸门和事故闸门的主梁 1/750。

2）露顶式工作闸门和事故闸门的主梁 1/600。

3）检修闸门的主梁 1/500。

4）次梁 1/250。

稳定验算时，对受弯、受压和偏心受压构件，应验算整体稳定和局部稳定性。闸门构件的长细比不应超过下列数值。

1）受压构件允许的长细比 主要构件 120；次要构件 150 联系构件 200。

2）受拉构件允许的长细比 主要构件 200；次要构件 250 联系构件 350。

闸门承重构件的钢板厚度和型钢截面不得小于以下尺寸。

1）6 mm 钢板。

2）∟ 50 mm × 6 mm 的等边角钢。

3）∟ 63 mm × 40 mm × 6 mm 的不等边角钢。

4）I12.6 的工字钢。

5）[8 的槽钢。

6.4 闸门焊接结构的典型实例

6.4.1 三峡永久船闸的人字闸门的焊接结构

人字闸门是船闸中普遍采用的一种闸门形式，它用于通航船闸中的工作闸门。一般只能在静水中操作。图 6.8-88 是我国三峡永久船闸中人字闸门之一。每扇人字闸门宽为 20.2 m，厚度 3 m，门体高为 38.5 m，单扇门叶重达 870 t。其船闸规模、结构尺寸、门体质量均为世界之最，是特大型薄壁焊接结构设计的典型。

该人字闸门在结构设计上有如下特点。

1）两扇门叶在平面上形成“人”字形，组成三铰拱结

构 闸门由两扇各自围绕其端部竖直轴旋转的门叶组成。当开启时，门扇各自转到闸首两侧闸墙的门龛内；关闭时，两扇门旋转到航道内，端部互相支承，在平面上构成“人”字形，并组成三铰拱结构。

2）门体采用平面式闸门结构，梁系同层布置 每扇门叶由门轴柱、中间部位的门体和斜接柱三部分组成（图6.8-89）。其中门体采用平面式闸门结构，而且梁系同层布置。在这样的门体结构上，主、次梁均与面板紧密焊接而整体工作，因而整体刚度大，并且构造简单，制造、安装较容易，造价低。

图6.8-88 三峡永久船闸的人字闸门



图 6.8-89　人字闸门门叶的截面结构
1—竖隔板（强纵梁）；2—垂直次梁；3—主横梁；
4—主横梁横加肋；5—竖隔板水平加肋；
6—主横梁纵加肋；7—面板

3）主横梁布置上疏下密，面板上薄下厚　闸门工作时从上而下水压力是增大的，为了既保证强度，又能减小板厚以节省钢材和减轻门体质量，采用等强度设计。即在面板背面（即下游侧）设置了 25 根主横梁，它们之间的距离随着水压力增加，从上到下逐渐减小；三块竖隔板（即强纵梁）从上到下在门体横截面上是均匀分布的；又在两竖隔板之间均匀布置四根垂直次梁。它们组成的梁格结构把整块面板分隔成 500 个四边固支的矩形板，这些矩形板的面积由于主横梁间距的变化也随着水压力增加从上而下减小。按强度确定的面板厚度相应地也从上而下增厚（实际上为了简化制造工艺，只用了 14 mm、16 mm 和 18 mm 三种厚度）。

4）为了纵、横梁的整体和局部稳定性，都合理地设置了加强肋　主横梁是一个主要承重构件，自身的刚度和稳定性对整个门叶的刚度起着决定性作用。梁高取 3 m；由于腹板较薄（40 mm），故在每一区格的腹板一侧均布三根纵向肋和一根横向肋以保证梁的刚度和稳定性。同理，与主横梁同高的竖隔板也在两侧设置了两根纵向肋，见图 6.8-90。

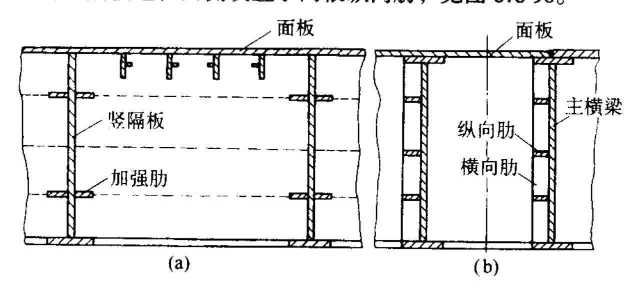


图 6.8-90　主横梁和竖隔板的加强肋

5）人字门背拉杆采用一端固定另一端穿过支座孔用螺纹副连接的双层背拉杆结构　人字门上游面为整块面板，下游面为梁格结构，两者连结成为一个上、下游面结构不对称（下游面开口）、受力不对称（偏载）的薄壁结构。弯心与形心不重合，运行时自重和外力不过弯心，引起门叶向上游面扭转和下垂变形。因此需设置背拉杆以提高门叶的抗扭刚度。拉杆结构有多种，均要求闸门在运行过程中要保持有一定的预应力。以往使用两端固定中部法兰螺栓连接的结构。其缺点是该结构造成门叶启闭时因应力交变而出现背拉杆与门体发生敲击导致应力松弛现象。本拉杆结构则克服了这个缺点，并改善了背拉杆预应力张拉工艺。

6.4.2　弧形闸门焊接结构的实例

（1）弧形闸门的一般特点

弧形闸门是应用最广的一种门型。它具有圆弧形的挡水面，并可绕其圆弧半径上的水平铰轴旋转，旋转幅度一般为闸门的挡水高度。这种闸门的转动中心（或称支铰中心）通常与圆弧形挡水面的圆心重合，即作用于该面上的总水压力总是通过支铰中心。因此，这种闸门的启闭力较之同尺寸的平面闸门为小。此外，闸门挡水面呈圆弧面，泄流时比较符合闸下自由出流的流线；闸墩侧面平直，对水流无干扰，因此这种闸门在泄洪时的水力条件比较好。

弧形闸门主要由门叶结构、支臂结构和支铰三大部分组成（见图 6.8-91）。按其门叶结构主要承重梁的布置，可分为主横梁式和主纵梁式两种构造形式。一般对宽扁型孔口宜采用主横梁式弧形闸门，而对高窄型孔口以采用主纵梁式为宜。梁系的连接也和平面闸门一样，有同层布置和叠层布置等方式。

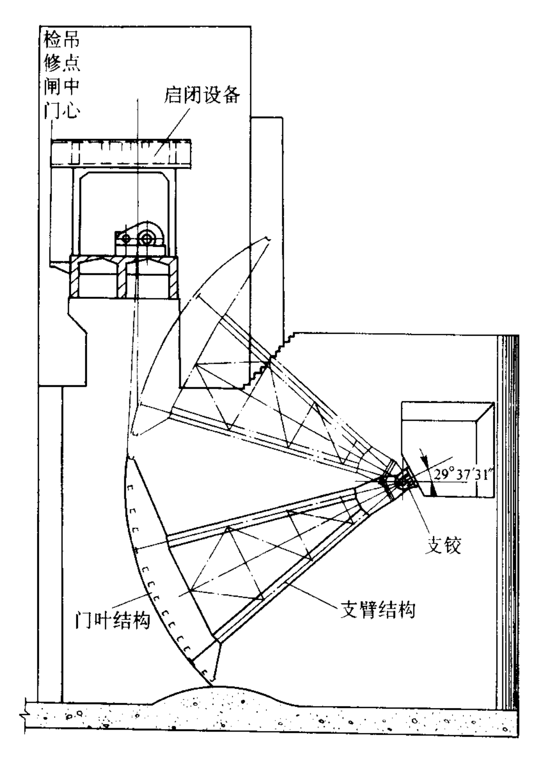


图 6.8-91　峡山水库弧形闸门总体布置图

主横梁和支臂组成独特的门架（又称框架）是弧形闸门的构造特征。它们之间的组成有图 6.8-92 所示的三种门架形式。图中Ⅰ型和Ⅱ型门架取 $C = 0.2\ L$ 左右，这样可大大减小主梁跨中截面的最大弯矩，从而能减小主梁截面并节省钢材。Ⅰ型适用于深孔闸门，Ⅱ型多用于大跨度露顶式孔口，当孔口净空不适应采用Ⅰ型和Ⅱ型时才采用Ⅲ型。主横梁和支臂连接的结构须具有足够的强度和刚性。受运输条件限制时，两者可用螺栓连接。若斜支臂与主横梁采用螺栓连接的结构时，须设抗剪板，见图 6.8-93。

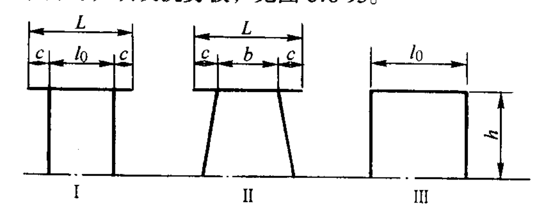


图 6.8-92　弧形闸门的门架形式

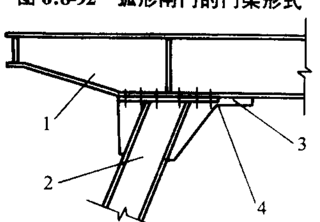


图 6.8-93　主横梁与斜支臂的连接结构
1—主横梁；2—斜支臂；3—抗剪板；4—端面保证接触良好

弧形闸门结构的计算目前采用平面体系，即按一般结构力学的分析和允许应力方法进行计算。弧形闸门的面板和纵向梁系可忽略其曲率影响近似按平板和直梁计算。面板、水

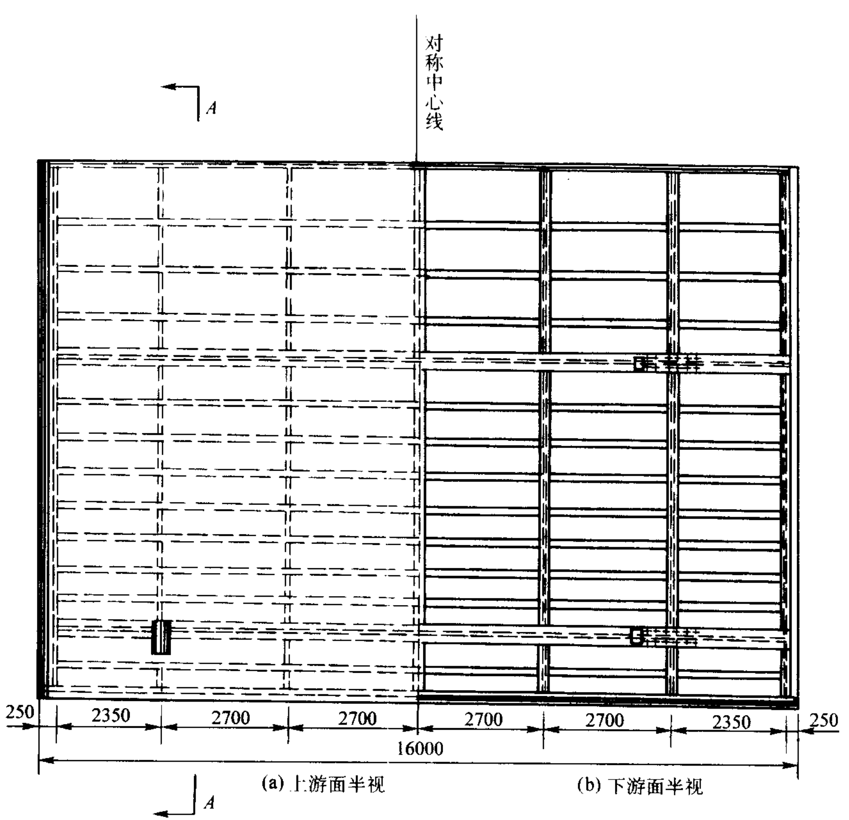


平次梁、垂直次梁（隔板）等构件均可参照平面闸门相应构件计算。

(2) 实例

1) 主横梁式弧形闸门的焊接结构

图6.8-94是我国峡山水库中的一扇弧形钢闸门结构图，它的总体布置已示于图6.8-91。该弧形闸门结构有如下特点。



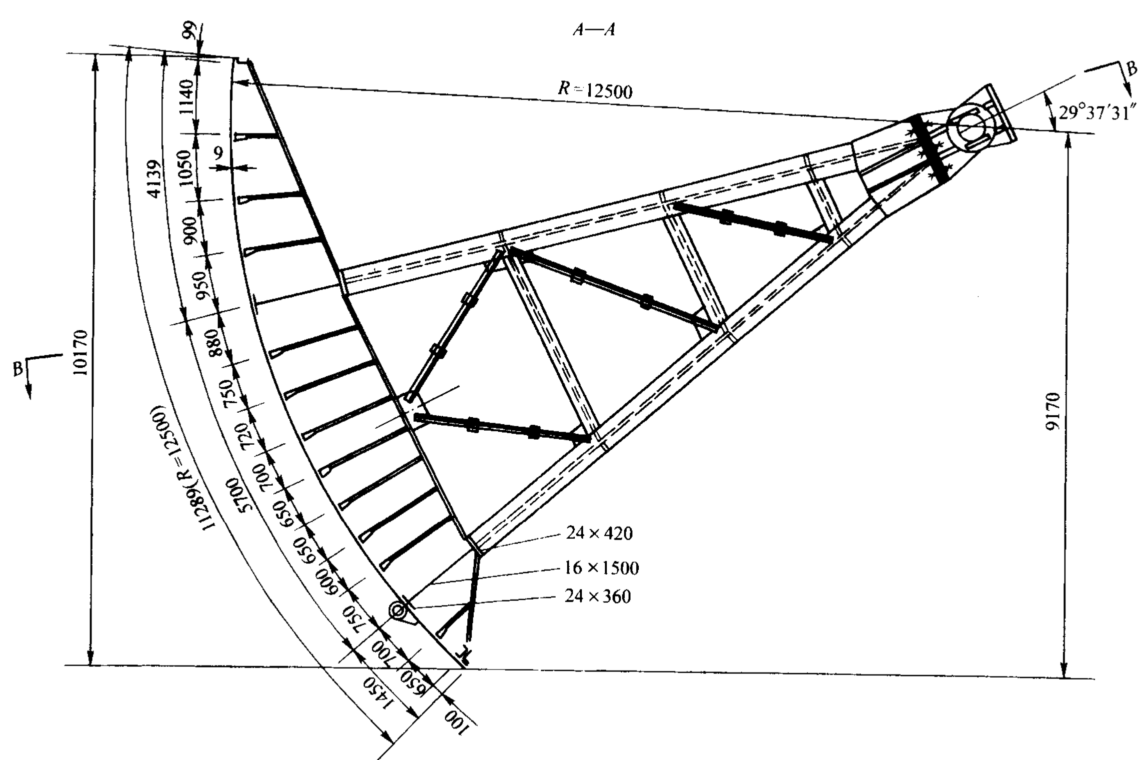
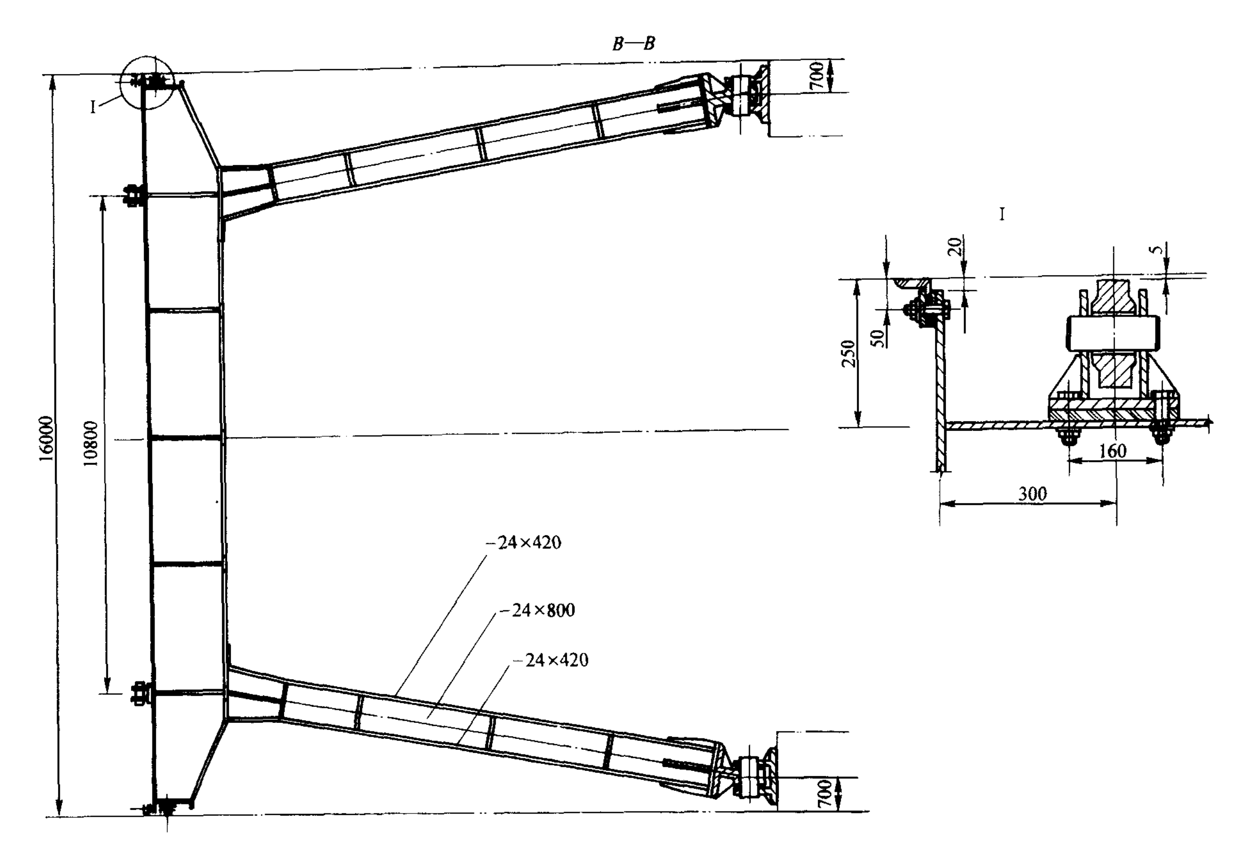


图6.8-94 峡山水库横梁式弧形闸门结构





续图 6.8-9

① 面板厚度 6 mm，与其宽、高相比属于薄壳结构。采用的是面板加梁系的结构形式，整个门叶为全焊结构。

② 梁系的连接是主横梁式同层布置。两根主横梁为工字截面的实腹梁，是主要承载构件。

③ 在垂直方向，设置 5 道实腹式隔板和两道边梁；在水平方向，除有顶、次梁外，还设置了 11 根水平次梁，它们的排列是上疏下密；薄壁的面板在这些梁格支撑下，具有足够的强度和刚度。

④ 每根主横梁用螺栓连接在两条斜支臂上，平面上构成两个带有悬臂的斜支臂主门架。斜支臂为工字截面实腹梁，支承在铸钢的支铰上，两者用螺栓连接。

⑤ 在闸门面板迎水面下主横梁处设置两个吊耳，与启闭机吊具相连，用固定卷扬式弧形闸门启闭机操作。

2）主纵梁式弧形闸门

我国三峡水利枢纽工程中泄洪深孔弧形闸门因泄洪孔口为高窄型，故采用主纵梁式弧形闸门结构，见图 6.8-95 所示。该闸门宽为 7 m，弧线长12.3 m(R = 16 m)，重约250 t。是国内最大弧形闸门之一，也是薄壳焊接结构具体应用的典型。

除具有上例所述的类似特点外，该弧形闸门结构还有如下主要特点。

① 门叶采用的是主纵梁式同层布置的连接结构。面板支承在垂直次梁和主纵梁上，而垂直次梁与主纵梁之间的高差，采用三根横梁支承前者，并与后者等高连接。两根主纵梁和三根横梁均为箱形截面梁，从而形成整体抗弯和抗扭刚度很强的门叶结构。

② 支臂与主纵梁连接组成纵梁主框架，水压力经面板、垂直次梁、横梁传给纵梁主框架，再通过支铰传至基础。这里面板直接参与主纵梁工作，降低了梁格连接高度，增加了闸门整体刚度。

③ 除支铰外，门叶、支臂和系杆都是焊接件，它们之间均用螺栓连接，构成了一个抗弯和抗扭刚度很大的立体栓焊结构。采用较多的螺栓连接，主要是考虑了运输条件、制造工艺、安装和维护等方面的需要。

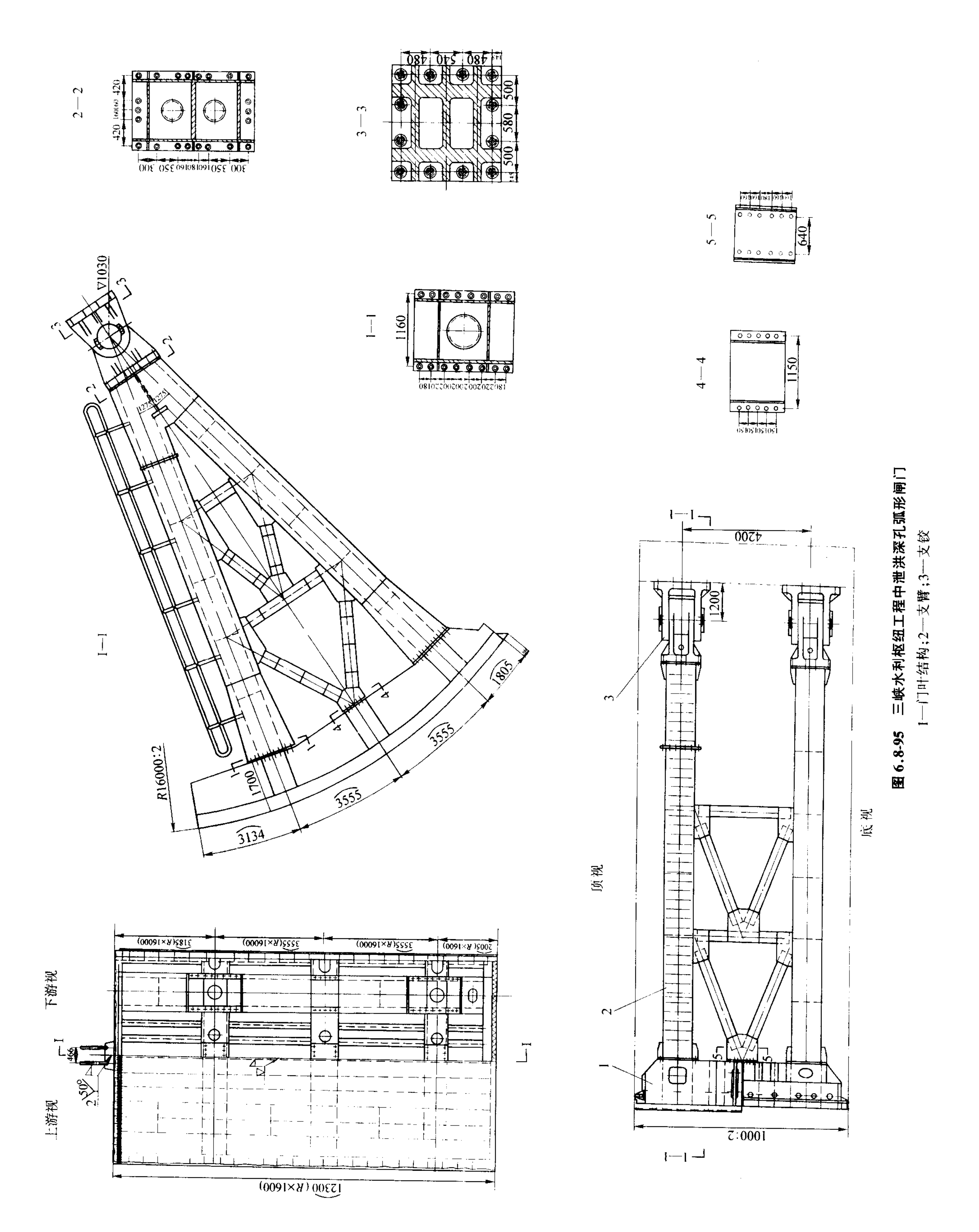


图 6.8-95 三峡水利枢纽工程中泄洪深孔弧形闸门

1—门叶结构；2—支臂；3—支铰

编写：陈祝年（山东大学）



参考文献

1 中国机械工程学会焊接学会编．焊接手册：第3卷．第2版．北京：机械工业出版社，2001

2 机械工程手册编委会编．机械工程手册：第1、3、4、5、12、13、16卷．第2版．北京：机械工业出版社，1996

3 陈祝年编著．焊接工程师手册．北京：机械工业出版社，2004

4 霍立兴编著．焊接结构工程强度．北京：机械工业出版社，1995

5 （德）D．拉达伊．焊接结构疲劳强度．郑朝云等译．北京：机械工业出版社，1994

6 邹家祥主编．现代机械设计理论与方法．北京：科学出版社，1990

7 洪其麟主编．机械结构可靠性．北京：航空工业出版社，1993

8 包头钢铁设计研究院等编著．钢结构设计与计算．北京：机械工业出版社，2000

9 建筑工程手册编委会编．建筑工程手册：建筑工程设计卷（下）．北京：地震出版社，1993

10 НикΛаев Г А．Винокуров В А．Сварнblеконструцkuии．Москва：Вълlсшая шкοлΛа，1990

11 徐灏主编．机械设计手册：第1、2、3卷．北京：机械工业出版社，1991

12 中国机械工程学会焊接学会焊接结构设计与制造（XV）委员会编．焊接结构设计手册．北京：机械工业出版社，1990

13 石道中．汽轮机设计基础．北京：机械工业出版社，1990

14 卜良峰等．五强溪电站水轮机主要结构的设计特点．大电机消息，1999，3

15 郑本英．分瓣转轮工地组焊技术发展．东方电动机，1992，3

16 劳动部．压力容器安全技术监察规程（99版）．北京：中国劳动社会保障出版社，1999

17 建筑结构构造资料集编委会编．建筑结构构造资料集：下册．北京：中国建筑工业出版社，1990

18 王燕等编著．轻钢结构．北京：冶金工业出版社，1999

19 汽车工程手册编委会编．汽车工程手册．北京：人民交通出版社，2001

20 龚微寒主编．汽车现代设计制造．北京：人民交通出版社，1995

21 中国水力发电工程编审委员会编．中国水力发电工程：水工卷．北京：中国电力出版社，2000

22 水电站电机设计手册编写组编．水电站电机设计手册：金属结构（一）．北京：水利电力出版社，1995

23 水利电力规划设计管理局编．水利水电工程露头式弧形钢闸门典型设计图册（JJT－A）．北京：水利电力出版社，1990

24 水利部．水利水电工程钢闸门设计规范（SL74－95）．北京：水利水电出版社，1995

25 陈家瑞主编．汽车构造．第三版（下册）．北京：人民交通出版社，1994

26 钢结构设计手册编辑委员会编．钢结构设计手册（上册）．（第三版）．北京：中国建筑工业出版社，2004

27 夏志斌等编著．钢结构—原理与设计．北京：中国建筑工业出版社，2004


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET



第7篇

焊接结构制造

主 编 史耀武

编 写 张建勋 黄蓝林 朱志明
王 政 王智慧 朴东光

审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET



第1章　焊接结构制造工艺

1　概述

随着现代工业技术的高速发展，作为机械制造重要手段之一的焊接技术，已被广泛应用于机械制造业的各个部门。焊接结构是指以焊接技术为主要连接手段的金属结构。在桥梁、储罐、压力容器、船舶等结构中，焊接是其制造过程中不可缺少的热加工技术。在焊接结构制造过程中需要考虑的基本问题如图7.1-1所示。在确保结构部件上焊接接头质量的同时，为了满足加工条件，既要提高生产率，又要通过改善制造时的作业环境来增加安全性。对于焊接结构制造技术人员来说，选择适当的材料，充实加工设备和技术工人的加工技术能力是重要的职责。

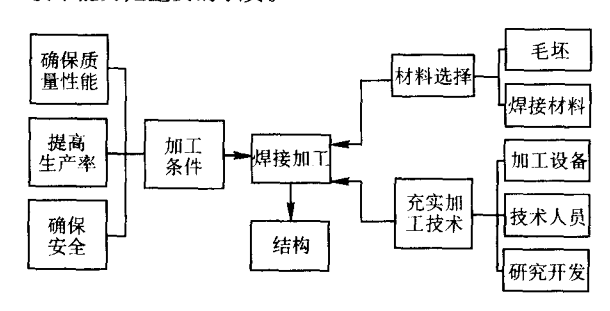


图7.1-1　结构制造中焊接工作问题的示意图

对焊接结构设计的要求，则是焊接结构的整体或各部分在其使用过程中不应产生致命的破坏。这些破坏包括弹性失效、失稳及断裂。从焊接结构的破坏事故的调查分析表明，作为裂纹发生原因的制造缺陷，大多与焊接接头有关。图7.1-2左侧表示对结构所要求的使用性能，取决于以下因素：载荷的大小和种类、使用温度、使用环境，并为由这些条件相应确定的设计原则所制约。影响焊接接头性能的因素如图7.1-2右侧所示，除材料选择外，还受到一些加工因素的影响。为了提高焊接结构的可靠性，重要的是要对焊接结构件的焊接接头性能问题，从设计、材料和加工方面作综合考虑。

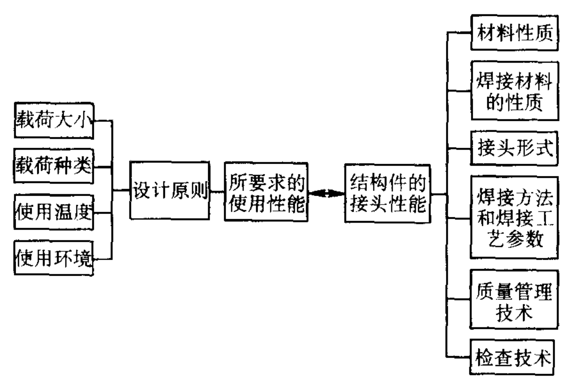


图7.1-2　焊接结构的设计与材料及加工的关系

1.1　焊接结构的特点

在先进工业国，焊接结构产品的用钢量已达到总钢产量的45%以上。为了制造如此庞大数量的焊接结构产品，需建立大量专门制造焊接结构的工厂（例如集装箱制造厂）；在更多的工厂（例如造船厂、起重机厂、锅炉厂）中，均设有焊接车间，并且是工厂的主要车间之一。焊接结构的特点表述如下。

① 刚性连接　焊接连接是一种金属原子间的连接，因此刚度大、整体性好，在外力作用下不像机械连接那样会因间隙变化而产生较大的变形，但更容易产生应力集中。同时，焊接连接方式容易保证产品的气密性与水密性。相对来说，焊接接头承受动载荷的能力不如铆接等机械连接，疲劳强度低。

② 异质异形连接　焊接可以方便地将各种不同几何尺寸的金属材料连接起来，也可以将不同种类的金属材料连接起来。焊接也可以将铸钢件与锻钢件连接起来，从而使结构中材料的分布更合理，不同性能的材料应用更恰当。另外，金属结构中各零部件间通常可直接用焊接连接，不需要附加的连接件，同时焊接接头的强度一般可与母材相等。焊接方法特别适用于几何尺寸大而材料较分散的制品，例如船壳、桁架等，焊接还可以将大型、复杂的结构分解为许多小零件或部件分别加工，然后通过焊接连成整个结构，从而扩大了工作面，简化了结构的加工工艺，缩短了加工周期。

③ 残余变形和应力　特别是在大型焊接结构制造中，对焊接变形预先控制的效果还不十分显著，许多生产厂家是在焊后通过矫形措施来保证尺寸精度，这样不仅费工费时，而且会导致复杂的焊接残余应力，从而影响产品的承载和使用性能。对于焊接应力控制也存在与焊接变形同样的问题，至于应力的降低与消除，虽然已采取了种种措施，但效果如何，在生产中常常是不进行检测的，即使有所测量，也没有具体标准可循，不知使焊接应力降低到何种程度为好。

1.2　焊接生产发展趋势

1.2.1　焊接结构的发展

焊接作为材料成形加工的主要手段之一正在向各个领域渗透。焊接新结构正在不断出现和完善。现代焊接结构在向着大型化和高参数方向发展，焊接结构的工作条件越来越苛刻，要求也越来越严格。如图7.1-3，图7.1-4所示的核压力容器及6 100 m深海探测器就是典型的现代焊接结构，该压力容器的壁厚已达200 mm左右，深海搜索器要承受巨大的海水压力。又如全焊接油轮（50万吨级）长382 m，宽168 m，高27 m，采用低碳钢和低合金结构钢制造，最大钢板厚度达140 mm。建造现代高层建筑的焊接钢屋架，通常都是将零部件在工厂内建成，然后再运到工地安装，所用材料强度级别达490 MPa以上，厚度达100～150 mm。

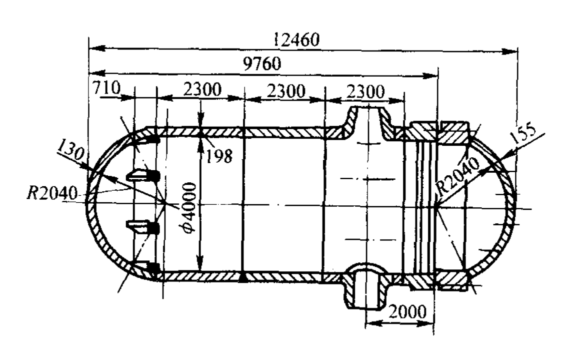


图7.1-3　核压力容器

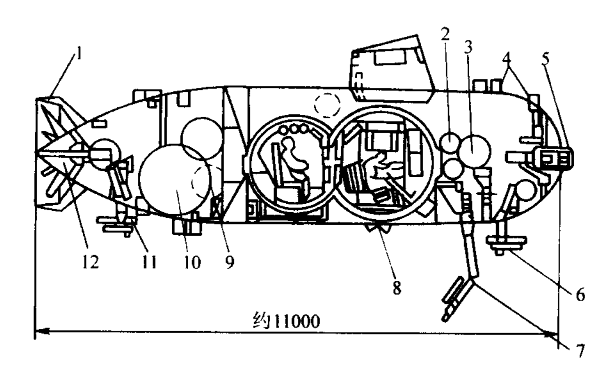


图 7.1-4　6 100 m 深海搜索器（DSSV）示意图

1—倾斜罩；2—液压系统；3—压力舱；4—声纳；5，12—螺旋桨系统；6，11—支承和摄影装置；7—操纵器；8—多普勒声纳；9—压水舱；10—燃料舱

现代焊接结构除尺寸越来越大之外，往往是在高温、高压或低温、深冷环境下工作的，有的是在动载或冲击条件下使用的。许多利用最新焊接技术制造的先进工业设备，例如，核电站用的单机功率高达 1.2 GW 的电站汽轮机及其配套的锅炉（工作压力为 32.4 MPa，蒸汽温度为 650℃）和高压容器；容积 5 080 m^3 的钢铁工业大型高炉；直径达 33 m、容积为 1 000 000 m^3 的储罐等，都是在复杂苛刻的条件下工作的焊接结构。

1.2.2　材料的发展

传统的焊接结构通常采用强度低、韧性良好的低碳钢或低合金结构钢制造。近年来，随着焊接技术的不断完善，高强钢在现代焊接结构中获得了广泛的应用。图 7.1-5 为日本统计的部分大型焊接结构所用钢材强度等级与采用的板厚规格。抗拉强度 784 MPa 的高强钢（HT80）已用于桥梁、高压水管、重型电机、海洋结构等，更高强度钢的应用研究也在进行之中。超高强度钢在航天、航海及机器制造业中应用也很广泛。用来制造固体燃料火箭发动机壳的 4340 钢，经过合适的淬火 - 回火处理后，其强度极限可达 1 765.3 MPa。不含碳的马氏体时效钢，如 18Ni 钢，是另一种常用的超高强度钢，这种钢在淬火状态下具有高韧性，便于热处理，也有良好的焊接性能。焊后经过时效处理，可获得 1 373 ~ 2 059.5 MPa的高强度；同时，这种钢还具有很高的抗脆性断裂及抗应力腐蚀的能力，国外正在推广用来制造某些结构，例如飞机零件、大直径固体燃料火箭外壳、冷冻机及船体结构等。据估计，近年内将有强度极限大于 2 300 MPa 的马氏体时效钢在工程中应用。

由于焊接结构的使用条件日益复杂和苛刻，各种抗腐蚀、抗高温，以及抗深冷脆断的合金钢，例如含镍量（Ni 质量分数）为 9%、5.5%和 3.5%的镍系低温钢、铬镍不锈钢、耐热钢、铝及铝合金、钛及钛合金都已用来制造焊接结构。

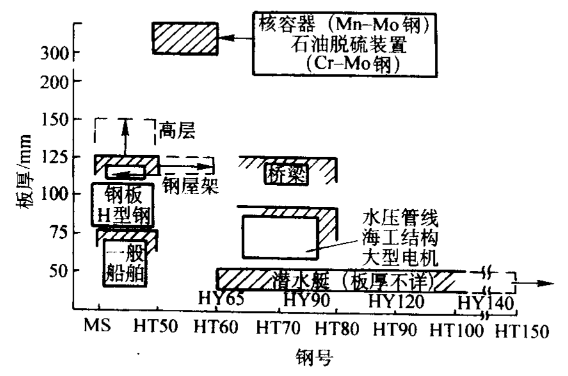


图 7.1-5　大型焊接结构用钢强度与板厚规格

1.2.3　自动化焊接的发展

数十年来，焊接技术和其他科学技术一样以迅猛的速度发展，诸如激光、电子束、等离子及气体保护焊等焊接方法的出现以及高质量、高性能焊接材料的不断发展和完善，使得几乎所有的工程材料都能实现焊接。而且焊接自动化迅速发展，自动化的生产方式在很多工业部门代替了手工焊生产方式。在各种焊接技术及系统中，以电子技术、信息技术及计算机技术综合应用为标志的焊接机械化自动化系统乃至焊接柔性制造系统，是信息时代焊接技术的重要特点。

焊接柔性制造系统（单元）是信息时代焊接技术的典型代表，一般情况下，它由焊接机器人、先进焊接电源、离线编程 CAD 系统、工装机械系统等组成，如图 7.1-6 所示。

焊接机器人具有比其他机器人更高超的能力，除能进行正常的行走及搬运外，还能自动跟踪焊接电弧轨迹，防止电弧及烟尘的干扰。

在焊接机械化、自动化系统中，采用的焊接电源均具有良好的动特性，大多采用以先进电子元器件及电子技术开发生产的焊接设备，如逆变式可控硅焊接电源 IGBT 等。焊接方法大多采用焊接质量高、生产率高的方法，如自动或半自动 CO_2 焊、MIG/MAG 焊、TIG 焊及埋弧焊等。

离线编程 CAD 系统使得焊接过程的编程自主地进行，并能对整个焊接过程的大部分动作进行模拟试验而不依赖于整个柔性系统。焊接是一个多变量的复杂过程，同时在焊接过程中也会产生热变形等其他变量，因此，很多目的在于预测这类变量情况的焊接工程软件应运而生，用来分析计算焊接过程的众多变量。这类软件在离线编程 CAD 系统中得到了广泛的应用。

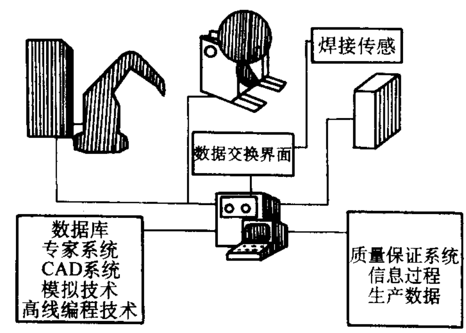


图 7.1-6　焊接柔性制造系统

2　制造工艺基础

焊接工艺设计是针对焊接产品而不是设计焊接产品。把各种原材料或半成品用以焊接为主的工艺手段，按照已设计好的图纸要求去制造（焊接）成焊接产品的制造过程和方法，才是焊接工艺设计的主要任务。所以，在设计焊接工艺之前，须了解焊接产品（焊接结构或构件）的生产过程、工艺过程和生产类型对生产活动的影响。

2.1　生产过程和工艺过程

（1）生产过程

任何工业产品的生产，都需要经过一定的生产过程。在工厂或车间里，通过人们的劳动使原料或半成品的形状和质量不断地按照人们的意图发生改变的过程，就叫生产过程。在生产过程中，除了进行着一些直接改变工件的几何形状，性质并把它们装配成机器的主要过程之外，还有一系列间接的辅助过程，如原材料的准备，材料及零部件的运输，设备装备的包装等等。因此，生产过程具体的定义应是：生产过程是把原材料变成成品的直接和间接的劳动过程的总合。

制造企业的生产过程一般是由许多部分组成的，根据各



部分在生产过程中的作用不同，可划分为以下三部分。

1）基本生产过程　基本生产过程是指对构成产品实体的劳动对象直接进行工艺加工的过程。如机械企业中的铸造、锻造、焊接、机械加工和装配等过程；纺织企业中的纺纱、织布和印染等过程。基本生产过程是企业的主要生产活动。

2）辅助生产过程　辅助生产过程是指为保证基本生产过程的正常进行而从事的各种辅助性生产活动的过程。如为基本生产提供动力、工具和维修工作等等。

3）生产服务过程　生产服务过程是指为保证生产活动顺利进行而提供的各种服务性工作。如供应工作，运输工作、技术检验工作等。

上述三部分彼此结合在一起，构成企业的整个生产过程。其中，基本生产过程是主导部分，其余各部分都是围绕着基本生产过程进行的。

（2）工艺过程

基本生产过程和辅助生产过程都是由若干相互联系的工艺阶段所组成。为了生产一部机器和一架结构，要经过一个或几个不同的加工工艺，例如锻造、冲压、切削、装配和焊接等。所以，工艺过程是逐步改变工件状况的那一部分生产过程，进一步说：工艺过程——是直接改变工件的几何形状、尺寸、力学性能以及物理化学性能的那一部分生产过程，它是生产过程中处理工艺技术方面问题的直接技术措施，因而也是进行生产的基础。原材料和半成品经过整个生产过程的各个工艺过程之后，就成为符合人们设计意图的结构或机器了。

焊接生产工艺过程的主要任务是要按照现代科学技术成就的水准解决产品制造中的全部技术问题（加工方法、工艺规范及相应的工艺措施）和确定装配和焊接接对象所应经历的工作位置的合理顺序（生产线路）。

一般的金属焊接结构的焊接生产工艺过程包括以下几个部分：

1）材料的获得、运输、存放、初步矫形及切割（包括予落料），这些工作一般在工厂材料仓库或车间材料库中进行；

2）将原材料加工成零件和毛坯或半成品的系列工艺，它们有划线（或放样、号料）、切割、校正、成形、端边加工、制孔和清理等，上述工作在焊接车间内备料加工工段进行；

3）运送半成品并存入中间仓库；

4）将零件或半成品装配焊接成部件或产品（装配焊接工段）；

5）技术检验（包括对原材料，半成品及成品检验）；

6）油漆包装、入库工作。

将金属焊接结构生产工艺过程表示如图7.1-7。可以看到，检验贯穿几乎全部的生产过程，每一个生产环节都不能离开检验，它是保证焊接结构质量的重要内容。

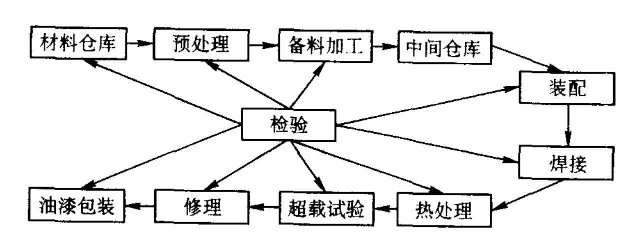


图7.1-7　金属焊接结构生产工艺过程简图

2.2　工艺过程的组成

金属结构的生产工艺过程是由很多环节的密切配合完成的。因此，为了提高生产率、保证产品质量，对其生产过程的各个环节进行合理的安排是非常重要的。通常把一个生产工艺过程分解为几个工序，工序是组成工艺过程的基本单元。

① 工序　是工艺过程的组成单元，它是在一个工作地点上由一个或一组工人用一种设备加工一个或一组工件所进行的一切动作。如在划线工作地上进行零件和在焊接工作台上进行工件直缝的焊接等。

② 安装　是工序的组成单元，它包括工件在夹固一次的期间内所完成的一切动作。例如将工件夹固在龙门刨上进行平面加工，这是一个安装；如需刨正反两面，且要翻动工件一次时，这时有两次夹紧，故为两个安装。

③ 工位　是安装或工序的一部分，它是工件在一次安装情况下工件或加工设备所处的加工位置。例如在转台上焊接工字梁上的四条焊缝，工件需转四个角度，即有四个工位；又例如图7.1-8所示的钢板拼接，焊机需调动二次，即在该焊接工序中包括有两个工位。

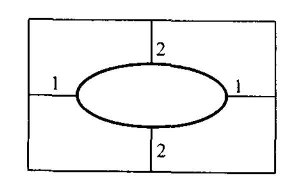


图7.1-8　钢板拼接图

④ 工步　是工序、安装或工位的一部分，在一个工位内工件、工具、装备和工作规范不变的情况下所完成的动作，工步可有简单工步和复杂工步之分。例如剖口多层对焊，规范不变时为一个工步，若电流需加大一次则为两个工步，这是简单工步；再如图7.1-9所示的工字梁的对称角焊缝，如果两条焊缝是用两部焊机同时进行焊接，则该工步为复杂工步，如果用一部焊机先后焊接，则为简单工步。

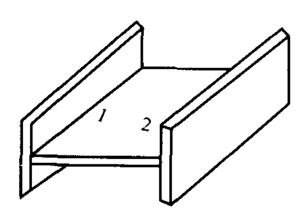


图7.1-9　工字梁示意图

工步是还保持着工艺过程一切特性的最小组成部分，因为在工步过程中工件的几何形状、力学性能和化学性能都将发生变化。为了实现这些变化必须动手或运动机器，它们在工艺上是不能分离的，如果继续划分下去，还有更换焊条加添焊剂和手工焊接中的运条等动作，通常称之为操作。它们虽不具有工艺过程的特性，但在制定工艺过程的技术定额时还是必须考虑的，尤其是在流水生产条件下。

分析工艺过程组成单元的主要目的在于了解这些环节的发生及影响这些环节的因素，从而在保证产品质量的条件下能够合理地简化工艺过程并计算和确定相应工艺单元的工时、材料、动力、能源消耗定额和人员组合等。要制定出合理的工艺过程，除了从上述技术处理措施着手外，还必须考虑这个过程在经济方面的有利性和组织方面的合理性，在大量生产情况下这是特别重要的。

上述生产类型的划分是定性式的，缺乏明确的界限概念，对某些产品（如船舶或拖拉机等）很难界定它们是成批亦或大量生产。1998年，原机械工业部颁布了一批有关生产工艺规程方面的行业标准，并指出除有特殊要求者外，均应予以采用。在JB/T9165·1—1998标准中关于生产类型的划分



如表7.1-1所示。

表7.1-1 生产类型的划分

生产类型	按生产产品的年产量分/台	按工作地负担的工序分
单件生产	1～10	不作规定
小批生产	>10～150	>20～40
中批生产	>150～500	>10～20
大批生产	>500～5 000	>1～10
大量生产	>5 000	1

该表在使用时似乎有失繁琐，在按年产量分类中摒弃了按吨/年计量，对建筑结构、矿山机械及桥梁等生产类型的界定将有一定困难。

2.3 生产类型与特征

任何一种焊接生产都属于下列生产类型之一，即单件生产、成批生产和大量生产三种。在同一个工厂或车间，生产类型可能是单一的，也可能是三种情况兼而有之。

1）单件生产 同一产品的生产数量较少，产品结构经常变化，并且事先难以确定重复生产的数量。因此，从所要求的设备看，通常采用通用型设备，不采用专用夹具和特种工具，以便适应加工各种不同零件的要求。从生产组织上看，只能将不同零件逐个按顺序生产，基本上没有流水作业，机床设备和工作地呈机群式分布，各工作位置或工段应设置零部件或半成品储存地。从生产方式看，装配时多采用划线方式，部件间不具有互换性，装配－焊接以手工操作为主，机械化程度低，工人专业化程度也低，工作地点不易固定，而且对工人的技术水平要求比较高。从工艺准备上看，通常只编制简单的工艺规程（工艺过程卡）及综合统计的定额。最后导致生产成本高及生产工人工资所占比例较大。

2）成批生产 一段时期内生产一定数量的同一产品，周期性地轮换生产若干种产品。因此，从设备条件上看，由于每一机床或机械装置周期性地重复加工几种零部件，可以采用专用夹具及特种工具。从生产组织上看，零部件交叉混合生产，有流水生产性，但各工序不同步，机床设备和工作场地布置应考虑流水生产的需要，需设置中间仓库。从生产方式上看，装配时采用分组选配（部分互换），还保留部分划线工作。装配—焊接工作可实现部分机械化，工人专业化程度稍高，而对工人技术水平要求稍低。从工艺准备上看，要编制工艺过程卡及部分重要工序的工艺卡片；对重复性及劳动量消耗大的各部件要进行定额标定，在产品成本中，生产工人工资所占比例较小。

3）大量生产 在相当长一段时期内只生产同一种产品，生产量很大。因此，从设备条件上看，可以广泛地采用各种专用设备及复杂的机械化高效工夹具与工艺装备。从生产组织上看，各类各型零部件同时平行生产，流水性强，各工序应同步；机床设备按工艺过程排列，通常无需中间仓库。从生产方式上看，装配工作完全不需要划线，零部件具有互换性或者在个别情况下选配；操作是高度机械化和自动化的。工人专业化程度极高，工作地点完全固定，一般对工人技术水平要求较低。从工艺准备上看，要详细地编制每一工序的工艺文件，并对全部相应工艺单元进行技术定额标定。在产品成本中，生产工人工资所占比例最低。

任何产品都具有自身的特点，也就是具有一定的工艺特点，表7.1-2表示了产品的自身特点对生产工艺的影响，表7.1-3则表示了工艺类型与生产类型的关系。由两表可以看出：工艺过程的特点是由产品特征和生产类型所决定的，在设计工艺之前，对产品进行详细的了解和工艺分析是必不可少的。

表7.1-2 产品的自身特点

分类方法	产品特点	对工艺过程的影响
复杂程度	简单	不划分部件，在一个流水线上将零件装成产品后焊接
	复杂	划分部件，分头同时制造之后，再将各部件流水线上之产品汇总到总装焊流水线上装焊
外型尺寸	大	工序之间单件运送。对极重要产品需固定装焊位置，生产工人流动
	小	重量轻，工序之间分批加工和运送。产品流动
产品质量	轻	易于自动传送流水，节奏性强，机械自动化程度高
	重	难以进行传送带流水生产，工序之间节奏难平衡
重要程度	不大重要	使用条件一般，可有重点地检验质量或仅进行外观检验
	很重要	全面检验生产环节并用专门的设备和工作位置

表7.1-3 工艺类型与生产类型的关系

生产类型	单件生产	成批生产	大量生产
产品数量	品种多数量少	品种和数量均较多	品种单一，数量很大
生产重复情况	经常交换产品	周期性重复加工	长期重复加工
生产方式	按工艺顺序加工，流水性弱	顺序平行式加工有部分流水，节奏不一定同步	平行流水生产，机械自动化流水，同步节奏
设备安排	通用设备机群式排列	部分专用与部分机群式混合排列	按工艺顺序排列，专用性强
机械自动化程度	通用夹具手工生产	部分专用，部分机械化	机械自动化高，专用性强



续表 7.1-3

生产类型	单件生产	成批生产	大量生产
装配方式	划线修配	部分划线、选配，部分零件有互换性	不需划线，工件互换性强
工人及工作地安排	专业化少，有堆放场及中间仓库	一定专业化。有中间仓库	工人及工作地皆固定，不需中间仓库，零配件循环供应
工艺过程及定额	粗定工艺过程，粗估定额	详订工艺规程，定额较精确	详订工艺工序，精确计算定额。工艺单元细化到工步或操作
技术等级及成本	要求熟练工人，生产成本高，效益较差	（介于二者之间）	技术水平要求低，成本低，效益最好

2.4 生产纲领和工艺文件

（1）生产纲领

生产纲领是一个生产基本单位（工厂或车间）的生产目标，它的一切生产活动都是围绕和实现这个目标而进行的。简单说，生产纲领就是工厂和车间的最高生产任务或其应具有的生产能力。因此生产纲领的具体表述是：工厂或车间在一年里生产多少吨或多少台产品，例如某焊接结构车间的生产纲领是：建筑钢结构1 400吨/年。容器类结构800吨/年，运油汽车底盘120台/年，其他金属构件120吨/年。该车间的总产量是5 000吨/年。详细的生产纲领还须包括结构图纸代号、名称、种类、数量、重量等。可以看出，生产纲领明确，产品特征、生产类型也就被决定了，它是建厂（车间）和组织生产的最主要依据。

（2）生产工艺文件

生产工艺文件是指生产活动中所遵循的规律和依据。它用书面形式明确规定了产品制造所应经历的工种、场地、设备、装备、工艺制度以及劳动组合、各项定额等等，它因此具有明显的实践性、强制性和指导性。工艺文件一般包括生产过程卡（或表格）、工艺过程卡、装配和焊接工艺卡、工序卡等，兹将各类卡片所应包括的内容介绍如下。

1）生产流程图表　对某一结构或构件，进行部、零件划分。根据各个部零件需要经历的生产过程制成方块图或列表，其具体内容有：

① 部、零件的代号、名称、质量和数量；

② 各部件需经历的加工地点（车间、工段等）；

③ 各部件所需的主要加工方法及工时；

④ 各部件最后到达到总装焊地点（或中间仓库）的时间和结构整体最后完成期限。

2）工艺过程卡　生产过程卡可以用生产流程图表示，也可参照工艺过程卡内容填写或编制，内容包括：

① 产品的名称、代号、材料、质量及数量；

② 加工地点、加工工序名称及顺序；

③ 各工序所用之加工设备、装备及工具；

④ 每一工序的工人人数、工种及级别；

⑤ 完成每一工序的估算定额。

3）备料工艺卡

① 产品的名称、代号、材料、质量及数量；

② 一次生产的零件数目；

③ 零件经过工序名称、顺序及零件在各工序加工后的尺寸及公差（常附简图说明）；

④ 设备、装备及工具的类型，详细的加工参数及有关加工的技术说明；

⑤ 各工序工种工人数、材料及劳动定额；

⑥ 各工序的检验方法及所用设备或工具。

4）装配－焊接工艺卡　在批量生产或大量生产中，可分别编制装配工艺卡及焊接卡，其主要内容如下：

①～⑥与备料工艺卡①～⑥相同；

⑦ 装配基面及装配顺序，预留余量或间隙数值；点固焊位置，焊缝长度及方法、材料；

⑧ 焊接方法、设备类型、规范参数，焊接顺序及方向，焊缝形状及尺寸等；

⑨ 焊条、焊丝、焊剂及气体的种类、规格、使用注意事项及消耗定额等；

⑩ 胎具、夹具和机械装置等的调节、检查和操作的方法、顺序及注意事项等。

5）检验工序卡　该卡除注明检验产品所使用的设备类型、工作规范、操作程序、工具量具等之外，尚需规定工人等级、工时定额、产品质量等级及检验结果、返修及复检程序，报废原因及依据等。

上述各种工艺文件的编制及使用情况决定于生产类型。对产品质量要求越高、越严，工艺文件的编制也越为详细和明确，为了保证产品质量和提高生产率，许多生产单位尚使用工艺质量传递卡、各种单项技术指示书等、各种技术试验任务书、技术学习及人员培训命令书等等。机械工业部的《工艺规程格式》（JB/T 916502—1998）标准中，各式卡片达30余种，兹介绍数种以供参考（见表7.1-4、表7.1-5、表7.1-6与表7.1-7），其余各种，请按该标准执行。

工艺文件在生产实践中具有法令性，正确合理的工艺文件是各类生产人员所必须执行的，否则，所引起的严重责任和技术事故，将以工艺文件为依据对有关人员追究法律责任。当工艺文件不适合生产实际时，须要经一定审批程序予以修订或重编。

工艺文件的具体格式是多种多样的，在包括上述各项基本内容的基础上，一般都印制成表格，由工艺技术人员填写，经批签后生效。

工艺文件的制订或编写，不能带有任何随意性，它是在工艺方案论证和进行详细地工艺分析之后才被确定的，它的每一项内容和要求都应是根据成熟的生产经验、科学试验和工艺试验的有效结果而提出的。因此，在编制工艺文件之前，必须对焊接产品进行工艺分析和方案论证，以熟悉和了解焊接生产的各个环节对焊接产品质量、生产率和经济效益的影响及相应关系，为制定出各项切实可行的工艺文件奠定坚实基础。

对工艺技术人员而言，填写各类工艺文件卡片是一项慎重、细致而又繁琐的重要工作，但当按照《工艺规程格式》标准实现系列化、标准化和通用化并且制成软件用计算机进行编写和管理之后，为生产工艺工作创造了极大的便利条件。有关计算机技术在焊接生产中的应用问题，将在第2、3、4章中有精辟阐述。

表7.1-4 工艺规程幅面和表头、表尾及附加栏

mm

297

50		22	34	22	34	20 格式1
(1)	(2)	产品型号	(3)	零（部）件图号	(5)	共(7)页
		产品名称	(4)	零（部）件名称	(6)	第(8)页

工艺规程幅面和表头、表尾及附加栏

描图
(9)
校对
(10)
底图号
(11)
装订号
(12)
(13)
(13)

(14)	(15)	(16)	(17)	(18)						编制（日期）	审核（日期）	会签（日期）		
标记	处数	更改文件号	签字	日期	标记	处数	更改文件号	签字	日期	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)
					8	8	20	15	15	27				

210; 25; 5; 15; 8.5; 5; 15; 7×10=70; 7; 5; 5×27=135

注：表头、表尾和附加栏（格式1）的填写内容如下。

空格号	填写内容	空格号	填写内容
(1)	填写（或印刷）各厂厂名的全称	(15)	填写同一次更改处数，一律用① ② ③… 填写
(2)	印刷各卡片名称	(16)	填写修改通知单的编号
(3)～(6)	一律按设计图样中的规定填写	(17)	修改人签名
(7)、(8)	分别用阿拉伯数字填写每个零件卡片的总页数和顺序数	(18)	填写修改日期
(9)、(10)	分别为描图员和校对者签名处	(19)～(21)	责任者签名并要注明日期
(11)、(12)	分别填写底图编号和装订编号	(13)、(22)、(23)	可根据需要填写
(14)	填写每次更改所使用的标记，一律用a,b,c…填写		

8

表7.1-5　焊接工艺卡片格式

	焊接工艺卡片	产品型号		零件名称			
		零件图号		零件名称		共　页	第　页

简图：

(17)

88

主要组成件				
序号	图号	名称	材料	件数
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
10	26	20	26	14

	工序号	工序内容	设备	工艺装备	电压或气压	电流或焊嘴号	焊条、焊丝、电极 型号	焊条、焊丝、电极 直径	焊剂	其他规范	工时
	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
描图											
描校											
底图号											
	8										
装订号			20	24	15	15	15	15	15	45	10

21×8=(168)

8

										设计（日期）	审核（日期）	标准化（日期）	会签（日期）	
标记	处数	更改文件号	签字	日期	标记	处数	更改文件号	签字	日期					

注：表中（　）填写内容如下。

(1) 序号用阿拉伯数字1、2、3、…填写；

(2)～(5) 分别填写焊接的零、部件图号名称，材料牌号和件数；按设计要求填写；

(6) 工序号；

(7) 每工序的焊接操作内容和主要技术要求；

(8)(9) 设备和工艺装备分别填写其型号或名称，必要时写其编号；

(10)～(16) 可根据实际需要填写；

(17) 绘制焊接简图。



表7.1-6 装配工艺过程卡片格式

	装配工艺过程卡片	产品型号		零件图号			
		产品名称		零件名称		共 页	第 页

工序号	工序名称	工序内容	装配部门	设备及工艺装备	辅助材料	工时定额/min
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
8	12		12	60	40	10

(row height 8; 19×8=(152))

描图
描校
底图号
装订号

										设计（日期）	审核（日期）	标准化（日期）	会签（日期）	
标记	处数	更改文件号	签字	日期	标记	处数	更改文件号	签字	日期					

注：表中（ ）填写内容如下。

(1) 工序号；

(2) 工序名称；

(3) 各工序装配内容和主要技术要求；

(4) 装配车间、工段或班组；

(5) 各工序所使用的设备和工艺装备；

(6) 各工序所需使用的辅助材料；

(7) 各工序的工时定额。

表7.1-7　装配工序卡片格式

工序号	(1)	工序名称	(2)	车间	(3)		(4)	设备	(5)	工序工时	(6)
10	10	20	60	10	20	10	20	10	40	25	

表头：装配工序卡片；产品型号；产品名称；零件图号；零件名称；共　页　第　页

简图：(7)

工步号	工步内容	工艺装备	辅助材料	工时定额/min
(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
8		50	50	10

尺寸标注：8；16；8×8=(64)

左侧栏：描图；描校；底图号；装订号

标记	处数	更改文件号	签字	日期	标记	处数	更改文件号	签字	日期	设计（日期）	审核（日期）	标准化（日期）	会签（日期）

注：表中（　）填写内容如下。

(1)工序号；
(2)装配本工序的名称；
(3)执行本工序的车间名称或代号；
(4)执行本工序的工段名称或代号；
(5)本工序所使用的设备型号名称；
(7)绘制装配简图或装配系统图；
(8)工步号；
(9)各工步名称、操作内容和主要技术要求；
(10)各工步所需使用的工艺装备型号名称或其编号；
(11)各工步所需使用的辅助材料。

3　焊接结构生产中的备料加工

合理的焊接工艺设计，除保证焊接接头性能与母材相适应、焊缝质量优良和无内外缺陷之外，还应保证产品的几何形状和尺寸以及产品在服役中的安全可靠性，前者的关键是焊接变形问题，后者是焊缝质量和焊接应力问题。

焊接结构生产过程中的材料准备、零件的备料加工是焊接生产中必经的工种工艺，它将直接或间接影响到整个焊接结构的质量和生产效率。零件毛坯加工质量不良，零件外形不符合要求，就会直接影响焊缝的质量。为了生产出质量优良的焊接产品，应有合理的材料备料加工工艺。焊接结构生产的备料加工主要包括，材料预处理、矫正、切割下料、成型、边缘加工、制孔等工序。这些工序经常是交错进行的，而且每道工序在结构生产过程中甚至不止执行一次。

3.1　钢材预处理

钢材预处理是通过机械或化学的方法对钢材表面附着的尘土、泥沙、油污和铁锈等进行清除，为后续工种施工创造条件和维护生产环境卫生。钢材进入车间加工之前进行预处理是结构制造中重要的工序之一。通常可以采用手工或风动钢丝刷或砂轮等方法清理钢材表面，这是小型车间经常使用的方法。对于大量生产的企业，则采用机械装置或化学方法进行钢材的预处理，实践证明，这种预处理比手工或风动钢丝刷清理钢材的耐腐蚀寿命要长5倍多。同时，钢材预处理对于提高产品质量，延长产品寿命，减少环境污染具有重要意义。

钢材预处理有机械除锈和化学除锈两种方法。

1）机械除锈方法　机械除锈方法是指采用机械装置进行除锈处理，并可实现多级联合自动化流水生产。作为例子，这里介绍一种钢材预处理装置GYX-nM，它是利用抛丸机械除锈的先进大型设备。既可用于钢板、型钢的表面处理，也可用于金属结构部件的表面清理。钢材经此清理，并经喷涂保护底漆、烘干处理等工序后，既可保护钢材在生产和使用过程中不再生锈，又不影响机械加工和焊接质量。该装置粉尘排放浓度150 mg/m^3，漆雾排放浓度0.3 mg/m^3，机器噪声90dB。钢材预处理装置技术性能见表7.1-8。

钢材预处理的具体工艺路线为：电磁吊料→升降输送→辊道输送→预热（40℃）→抛丸除锈→清理丸料→自动喷漆→烘干（60℃）→快速输送→出料。见图7.1-10。

2）化学除锈方法　化学除锈方法是利用除锈液在室温条件下对钢材上锈层和氧化皮发生溶解、渗透、剥离作用，使锈层和氧化皮很快溶解和脱落。经此处理后再敷以钝化液，它能在室温条件下自动调整pH值，使钢材表面处于钝化状态并形成钝化膜，这种方法可以保持约一个月不再生锈。并产生新的化学活性中心，增强与涂层的附着力。

通常，根据工件尺寸和数量，采用浸渍和喷射方法进行化学除锈。

3.2　钢材的矫正

钢材通常是以板材和各种型钢供货的，其在运送到金属结构厂以前，有些情况下需要矫正，这里称为第一次矫正。矫正的原因主要是由于钢材在轧制过程中加热和冷却的不均匀性、钢材在运输装卸和存放过程中的不当操作等原因使钢材的形状发生改变，通常称之为变形。常见的变形有弯曲变形、扭曲变形、局部变形及表面不平等。这些变形如果超过了制造标准中的允许值，就称之为缺陷，它直接影响到划线和出料的正确性。因此，必须经过矫正消除这些缺陷以保证划线、号料及出料等工作的精度要求。“钢结构制造技术操作规程”规定一般情况下划线，号料前钢料允许变形数值如表7.1-9所示。若变形在允许范围内，可以不进行矫正。同样的道理，材料在下料（通常采用气割或剪切方法）之后，钢材也会产生某种形式的变形，如弯曲、扭曲等，变形如果超过了制造标准中的允许值，就会影响到后续的加工和装配焊接工序，这时的矫正称之为二次矫正。

表7.1-8　GYX－nM钢材预处理装置技术数据

<table>
<tr><th>序号</th><th colspan="2">项目</th><th>GYX－3M</th><th>GYX－2M</th></tr>
<tr><td rowspan="9">1</td><td rowspan="9">处理钢材规格</td><td rowspan="3">钢板</td><td>宽1 000～3 000 mm</td><td>宽1 000～2 000 mm</td></tr>
<tr><td colspan="2">厚6～60 mm</td></tr>
<tr><td colspan="2">长2 400～12 000 mm</td></tr>
<tr><td rowspan="3">型钢</td><td colspan="2">最小断面尺寸60×8 mm</td></tr>
<tr><td colspan="2">最大断面尺寸1 000 mm×300 mm</td></tr>
<tr><td colspan="2">长2 400～12 000 mm</td></tr>
<tr><td rowspan="3">构件</td><td>最大高度800 mm</td><td></td></tr>
<tr><td>最大宽度1 450 mm</td><td></td></tr>
<tr><td>长2 400～12 000 mm</td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td colspan="2">辊道最大负荷</td><td>2t/m</td><td>1t/m</td></tr>
<tr><td>3</td><td colspan="2">工件输送速度</td><td>V＝0.8～4 m/min，无级变速</td><td>清理板材 v＝2～3 m/min
清理型材 v＝1～2.2 m/min</td></tr>
<tr><td>4</td><td colspan="2">年处理量</td><td>20 000～40 000 t</td><td>10 000～30 000 t</td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">质量</td><td>除锈等级</td><td colspan="2">SISO55900 Sa 5/2（A B）</td></tr>
<tr><td>涂膜等级</td><td colspan="2">15～25 μm</td></tr>
<tr><td>6</td><td colspan="2">外形尺寸</td><td>长55 545×宽12 655×高7 782
（不包括通风设备）</td><td>长62 000×宽12 000×高7 230
（不包括通风设备）</td></tr>
</table>



续表 7.1-8

序　号	项　　目		GYX－3M	GYX－2M
7	动力消耗	总电量	390.9 kW（不含预热）	440 kW（包括预热 200 kW）
		总通风量	37 619 m^3/h	29 600 m^3/h
		煤气量	420 m^3/h（电加热 225 kW）	
		压缩空气量	400 m^3/h	400 m^3/h
8	设备总重		～130 t	～100 t

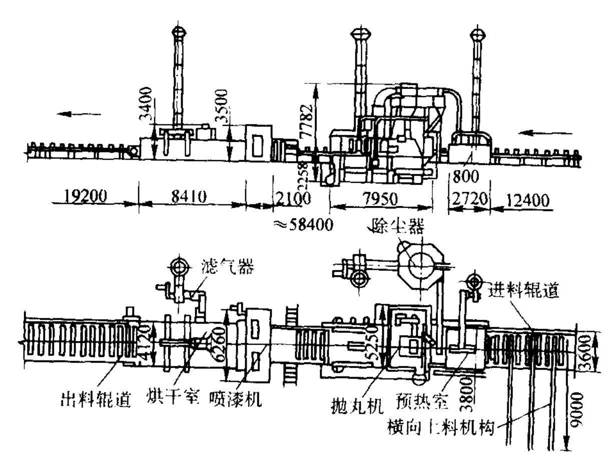


图 7.1-10　GYX-nM 预处理装置示意图

可以认为钢材的任何一种变形都是由于其中一部分金属较另一部分金属伸长（或缩短）造成的。因此矫正工序就是设法将较长的金属缩短或短的伸长来达到矫形的目的。矫正变形的工作原理是施加外力或加热使钢材变形处的局部或全部处于屈服状态，迫使金属发生一定的塑性变形，来消除不规则变形。

钢材矫正通常是在冷状态下进行，只有当钢材的变形相当严重或工件刚度很大时，过大的冷矫正变形会损耗钢材的机械性能或设备能力不足时，需用热矫正方法。表 7.1-10 表示了低碳钢在冷矫正和冷弯曲时允许的最小曲率半径（r_{min}）及最大挠度（f_{max}）值，如果超出表中规定的数值必须采用热矫正，低碳钢热矫正在 800～1 100℃范围内进行。温度不能过高或过低，矫正后要求空冷。

钢材矫正方法有采用机械设备进行矫正法和采用手工进行矫正法。

表 7.1-9　号料前钢板和型钢变形的允许值

名称	缺陷	测量法	示　意　图	变形允许值	备　注
钢板	局部不平	平尺	1000　f　δ	$\delta > 14mm$，$f \leqslant 1mm$ $\delta > 14mm$，$f \leqslant 1.5mm$	δ 为钢板厚度
角钢	全长弯曲 翼缘倾斜	拉线法 弯尺	f　L　f　b	$f \leqslant$（5/1 000）L $f \leqslant$（1/100）b 及 $\leqslant 1.5$ mm	不等边角钢按大面计算
工字钢	弯曲	拉线法	f　L	$f \leqslant$（5/1 000）L	
	扭曲	观察后用垂线	L　f	$L < 10$ m　$f \leqslant 3$ mm $L < 10$ m　$f \leqslant 5$ mm	
	翼缘偏斜		f　f　b　b	$f \leqslant (1/100)b$	

表 7.1-10　低碳钢在冷矫正和冷弯曲时允许的 r_{min} 及 f_{max}

顺序号	名　称	简　　图	轴　线	矫　正　弯　曲			
				r_{min}	f_{max}	r_{min}	f_{max}
1	钢板，宽扁钢，扁钢	2　δ　2	1－1	50δ	$L^2/400\delta$	25δ	$L^2/200\delta$

续表 7.1-10

顺序号	名　称	简　　图	轴　线	矫　正　弯　曲			
				r_{min}	f_{max}	r_{min}	f_{max}
2	角钢		1－1	90 h	$L^2/720$ h	45 h	$L^2/350$ h
3	槽钢		1－1	50 h	$L^2/400$ h	25 h	$L^2/200$ h
			2－2	90 h	$L^2/720$ h	45 h	$L^2/360$ h
4	工字钢		1－1	50 h	$L^2/400$ h	25 h	$L^2/200$ h
			2－2	50b	$L^2/400b$	25b	$L^2/200b$

注：L 为弯曲弦长，mm；δ 为板厚，mm。

3.2.1　手工矫正法

手工矫正法所用的主要工具包括，平台、手锤、大锤和平锤等。当钢板出现如图 7.1-11 所示的"马刀弯"变形时，可把钢板置于平台上，用大锤通过平锤打击构件缩短的区域，使之伸长，从而达到矫正的目的。图 7.1-11a 表示较薄钢板时的锤击位置；当钢板较厚时，应采用图 7.1-11b 的锤击位置，即呈三角形的方位进行锤击，能收到良好的效果。

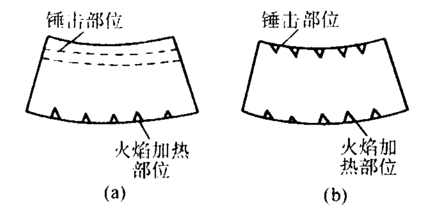


图 7.1-11　手工矫正"马刀弯"变形简图

当钢板呈中间凸起超出钢板平面的变形时，如图 7.1-12，矫正的方法应用大锤通过平锤按图 7.1-12 中所示的次序与位置进行锤击。使钢料向外伸长，拉伸中央的材料，凸起部分就能消除。禁止从凸起部分锤击。应当注意，当钢板太薄或太厚时，不能用此法矫正；另外，在同一部位不应锤击次数过多，以免材料硬化，过大地损伤材料力学性能。

用手工矫正虽然简单、灵活，不需要复杂的机械设备，但其本身有很大的缺点：①劳动强度大。②钢板直接受集中冲击，会产生严重的局部变形，冷作硬化严重，力学性能受不良影响，所以只能用于不重要的工件。③只能矫正厚度不大的钢板。因此，手工矫正是在缺乏机械设备或矫正工作不能在机械设备上进行时才使用的。一般工厂中都备有机械矫正设备。

3.2.2　机械矫正法

机械矫正法常见的机械设备有钢板矫正机（平板机），

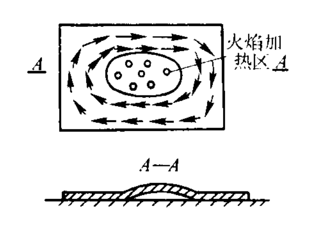


图 7.1-12　矫正平面凸起示意图

型钢矫正机等。

① 钢板矫正机（又称平板机）　其工作示意图见图 7.1-13，被矫正的钢板通过具有两列交错排列的辊子，上下辊之间的空隙比被矫正钢板的厚度略小些，沿着移动的方向钢板多次反复地在垂直平面内上下弯曲。原来短的纤维经过弯曲而伸长，最后钢板各部纤维长度一致，不平之处随之消除。矫正后钢板的力学性能变化不大，但应该注意到上下两辊之间的空隙不能过小，空隙过小既损伤设备又加大钢板的变形，损害材料的力学性能。通常低碳钢板经过矫正后伸长的增加量在 1‰范围内。

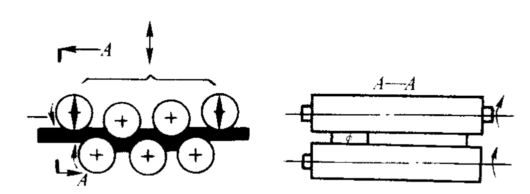


图 7.1-13　多辊平板机辊子工作示意图

钢板矫正机上辊能上下调节，以适应不同厚度的钢板，上下辊都是主动的。调节上列最外边的两个辊子的高度，可以得到平板和带有弯曲的板；也可以利用平板机消除如图 7.1-11 所示的钢板"马刀弯"变形，此时在"马刀弯"凹边



区域垫上厚度为 2 ~ 5 mm 的纸板，造成集中压力，使凹边伸长。

钢板矫正机的辊子的数目，依被矫正钢板的厚度而定，一般具有 5 ~ 11 个辊子（厚度在 5 ~ 40 mm 范围内），薄板（厚度小于 4 mm）由于轧制过程中容易产生较大的波浪变形，矫正较困难，一般用辊子数目多、辊子直径要小，才能克服原有的变形。为了便于操作，提高生产率，钢板矫正机应设有操作台（图 7.1-14）。操作台应布置在矫正机两面，并使被矫正钢板位于下辊顶点的平面上。

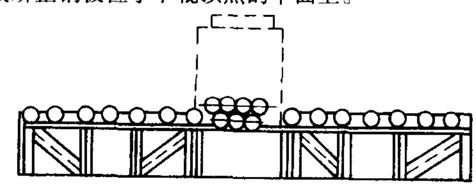


图 7.1-14 钢板矫正机的操作台示意图

② 型钢矫正机 对于角钢、槽钢、工字钢的校正可以在型钢矫正机上进行。矫正过程和工作原理与钢板矫正机相同，但它的特点是具有与被矫正的型钢相适应的上下两列滚轮（图 7.1-15）。这些滚轮也是上下互相交错排列的。利用这种机器能矫正沿型钢长度的弯曲和型钢断面几何形状的变形。

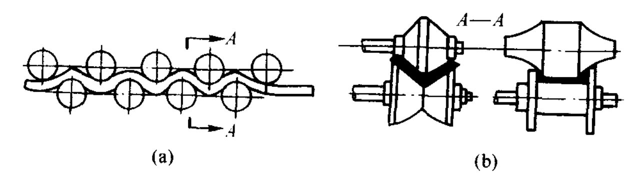


图 7.1-15 型钢矫直机滚轮工作示意图

③ 调直机（顶床） 对于只要求在整个长度上矫直的型钢，可以在调直机上进行，调直机的工作过程如图 7.1-16 所示，被矫正的型钢 1 放在两支承 2 上，由压头 3 往返对型钢顶压，使型钢产生与原有弯曲相反的弯曲以达到矫正目的。两支承的距离 L 可以根据型钢的大小调节。型钢的型号越大，支承距也越大。当型钢在垂直面和水平面上均有弯曲需矫正时，应该先矫正刚度大的一面。

目前，由于焊件或材料截面越来越大，矫正机械除专用者外，多采用功率较大的悬臂式、龙门式或立柱横梁式液压压力机并辅以适当工具模具，他们既可以矫正变形，又可以用作成形或热态模压、其最大压力可达数十顿至数千顿。其工作原理及结构形式不另赘述。

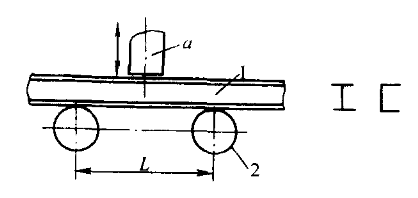


图 7.1-16 调直机调直简图

3.2.3 火焰矫正

除采用手工锤击及机械矫正变形外，经常还见到采用局部加热方法消除钢板的变形。如图 7.1-17 所示的“马刀弯”变形可靠近凸边处适当的用三角形局部加热来消除变形。图 7.1-12 中间凸起变形可在凸起变形部位点状加热以消除变形。

火焰矫正是利用气焊和气割的焊炬、割炬或专用的火焰矫正加热枪，加热被矫正钢材或焊件的变形部位，如纤维伸长变形部位，使之产生压缩塑性变形，然后速冷，使伸长纤维缩短，从而消除变形。火焰矫正加热的方式根据所矫正钢材或工件变形特点而异，有点状、线状和三角形三种方式。点状加热是使加热区呈小面积圆形，如图 7.1-17a；线状加热是使加热区呈长带（线）状，带的宽窄随板厚而异，板厚越大，加热线越宽，其特点是宽度方向收缩大，长度方向收缩小，如图 7.1-17b 所示；三角形加热则是使加热区呈等腰三角形，其特点是收缩量从三角形顶点到底边逐渐增大，如图 7.1-17c 所示，将底边沿工件布置，利用此不均匀收缩矫正工件的弯曲变形。加热温度控制在钢材回火温度以下，加热后工件通常在空气中冷却，有时为提高矫正效率，在工件正面和背面喷水冷却。实验研究结果表明，对低碳钢和 Q345（16Mn）钢采用水冷对钢材的力学性能无影响，但对有淬硬倾向的钢材应慎重。火焰矫正方法简单、灵活、快速、效率高、效果好，适用于单件及小批量结构件的一次矫正。

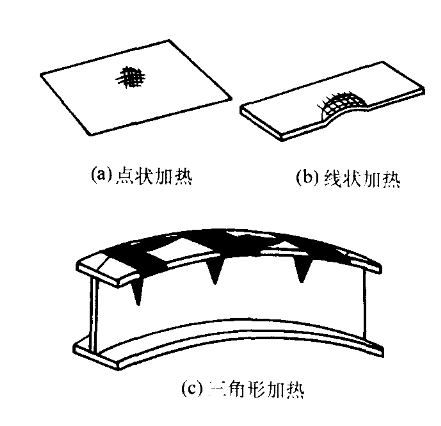


图 7.1-17 火焰矫正

3.3 划线、放样及号料

把零件的图纸尺寸用作图法按 1:1 的比例直接画到钢材上，称之划线。划线是结构制造中较为复杂、细致的工作，要求所划零件尺寸、形状正确并合理地使用钢材。因此划线前应看懂图纸，明确零件的尺寸、形状和技术要求。划线时先确定基准线，作为量取其他尺寸的依据。一般基准线是十字线或直角线，然后从基准线出发，确定其他水平线、垂直线，再划弧线。如图 7.1-18 枕梁腹板的划线，先在钢板上图一直角线 OA、OB 为基准线。将腹板外形的一轮廓线直线 ad 与基准线 OA 重合（圆形的零件基准是十字线，其交点为圆的中心），然后由 ad 出发确定其它位置。划线时用直尺，但长度大于 2 ~ 3 m 的直线，可用粉线弹出之后再用样冲打眼，间距 40 ~ 60 mm，石笔划线的线条宽度应小于 0.5 mm，粉线弹出的线条宽度不应大于 1 mm。孔的中心除用样冲打出外，还需用铅粉划半圆标出。在大片钢板上划线时，为了保证精度，垂直线不能用直尺直接画出，需用几何作图法对已画出的基准线作垂线，划线的精度要求应该是零件间连接尺寸的许可误差且不大于 0.25 ~ 0.5 mm。长度大于 1.0 m 时，许可误差为 0.5 ~ 1.5 mm。

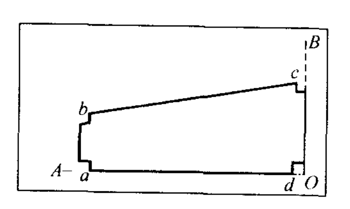


图 7.1-18 画线基准示意图

上述直接按图纸尺寸在钢板上逐一划线，既费时又麻烦。因此它适用于单件生产或重复次数不多的结构中。在成批生产和重复次数较多时，为了提高生产率和节约原材料，一般先做成样板，用样板进行划线，即称号料。放样是将加工零件按图纸尺寸 1:1 画到样台或样板材料上，从而做成样板（或样杆）。样板上要标出零件的尺寸、断面、数量、编号、孔眼直径和特殊加工符号（如弯头、铲平、刨边等）等。样板是画线的标准，对样板的要求是制造精确，轻便耐用，经久不变形。所用材料有薄铁皮、油毛毡、马粪纸、木条和竹片等。对于在室外工作或大量生产及长时间使用的一般采用 0.4 ~ 1 mm 的薄铁皮，如罐车生产中所用的样板都是薄铁皮材料。样板制作公差应符合表 7.1-11 的规定。为了保证号料的精度，一切样板、样杆必须固定在钢材上，号料时允许公差如表 7.1-12 所示。在划线和号料时，应考虑到焊接产生的收缩变形和其后进行的切割及其他加工所需的余量；各种加工所需的余量示于表 7.1-13 中。关于焊接收缩变形的补偿余量应根据工厂的实验和经验确定，一般按 1‰ 预留余量。

表 7.1-11　样板制作允许偏差

尺寸名称	总长	总宽	两端孔中心距	相邻孔中心距	上下最外面孔心距	空心位置	矩形对角线
公差/mm	-1.0	-1.0	-1.0	-0.5	-0.5	<0.5	-1.0

表 7.1-12　按样板、样杆号料公差

尺寸名称	长度宽度	两端孔心距	相邻孔心距	两排孔心距	洋冲印与孔心偏差	洋冲印与线偏差
公差/mm	-1.0	-1.0	±0.5	±0.5	<0.5	±0.5

表 7.1-13　各种加工方法所需余量

加工方法	自动及半自动切割	手工气割与剪切	气割后铣刨边缘	剪切后铣刨边缘
余量	3	4	4 ~ 5	4 ~ 6

3.4　钢材的下料

按钢材上所划的轮廓切割成所需要零件的过程叫下料，常采用下料的方法有：机械切割（剪、锯）和热切割，如火焰切割（氧气切割、等离子切割）、等离子切割、激光切割等。

3.4.1　机械切割

钢板的机械剪切一般用剪板机进行。常见的有龙门剪床。剪断钢板的机理如图 7.1-19 所示。依靠上剪刀对固定的下剪刀做上下运动来达到。在剪床上剪切钢板应该注意如下几个问题：

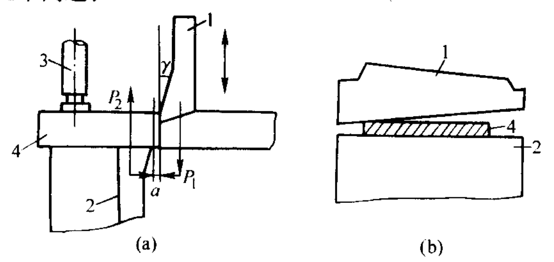


图 7.1-19　剪床剪切过程示意图

1—上剪刀；2—下剪刀；3—压头；4—钢板

1）冷作硬化　由于在剪切过程中切口附近金属内发生挤压、弯曲和剪断时而产生很大的变形，因此产生冷作硬化区域，硬化区域的宽度一般在 1.5 ~ 2.5 mm（板厚小于 25 mm时）范围内，这个区域的宽度与下列因素有关：

① 钢材的力学性能　钢材的塑性愈好，区域愈宽，反之，则硬化区宽度愈小；

② 钢板的厚度　随着钢板的厚度增加，硬化区的宽度也增大；

③ 剪刀的锐利状况　剪刀锋较钝时，硬化区较宽；

④ 剪刀之间的间隙（a）　a 应尽可能小，实际上两刀刃之间总有着少许间隙。一般 $a < 0.5 \sim 0.6$ mm；

⑤ 压紧装置的位置及力量　当压紧装置距离上刀尖愈近及压紧力愈大时，则硬化区宽度愈小。

⑥ 上剪刀斜角（γ）　γ 愈大，剪切同样厚度的钢板时，所需的剪切力愈小，硬化区宽度就小。

在切口边缘产生的这个硬化区。一般使钢材屈服强度增高，塑性降低，材料变脆。因此在制造重要的焊接结构时，非焊口的边缘应铣刨去此区域，一般规定刨削量为 3 ~ 6 mm。对于焊口处的硬化区，由于焊接热作用，相当于正火处理，可以完全消除硬化的影响，力学性能几乎可以完全恢复，所以不需要去除。

2）切口平整问题　影响切口平整的因素和影响切口边缘硬化区宽度的因素相似。凡是增大硬化区宽度的因素都是增加切口不平整的因素。反之就能有利于切口的平整。

3）变形问题　钢板在切断过程中有挤压变形，以及剪刀有一个倾斜角使钢板产生扭曲现象，剪切 6 ~ 8 mm 以下钢板时，零件还有弯曲变形。

此外为了减少刀片对钢板的摩擦。刀片前面应做成 $\gamma = 1° \sim 3°$的斜角。

利用龙门式剪床剪切钢板，生产率高、切口平整，有的还省去划线，号料工序。但是龙门剪床只能切直边，剪切厚度（一般均小于 25 mm）和宽度受到限制，切口有冷作硬化现象。我国有关部门及学术组织在 1985 年以后即大力提倡用热切割代替大型剪床对 6 mm 以上钢板进行下料，随着全自动计算机控制切割机床的推广与普及，龙门剪床已逐步淡出焊接生产范畴。

上下具有一对圆盘形刀刃的剪床叫圆盘式剪床（工作原理与龙门剪相同）。如图 7.1-20，它可以剪很长的条料，也可剪切圆形或曲线。

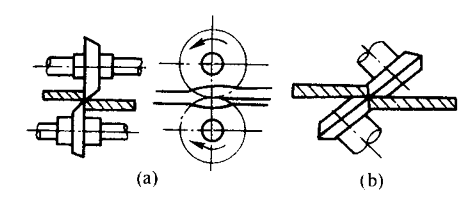


图 7.1-20　圆盘剪床工作示意图

专用于剪断型钢的有型钢剪断机。如国产 Q41 - 100 型钢剪断机可剪圆钢、方钢、工字钢和槽钢。既能剪钢板、型钢，又能冲孔的机械叫联合冲剪机。

机械切割除用剪床外，还可用锯割。有齿锯是利用锯条或锯带切断金属。无齿锯是利用高速旋转的砂轮圆片与钢材磨擦生热来切除金属，达到切割的目的。锯割比剪切钢材变形小，硬化区小，可以认为锯口没有硬化区，但锯割生产率低，目前只应用于型钢和铜、铝等高塑性材料及铸铁、不锈钢等难熔材料的切割上。

3.4.2　热切割

钢材的热切割是指采用某种热源局部加热金属至熔化，甚至燃烧，在辅助气流的作用下吹走熔融金属，从而产生切口，达到切割金属的目的。切割方法有火焰切割、等离子切割、激光切割等。



1）气割　气割所用的燃气为氧－乙炔切割时，是用乙炔作燃气。当用丙烷、丙烯、天然气或汽油等作燃气取代乙炔时，称为氧－丙烷（烯）、氧－天然气切割。用这些燃气取代乙炔是由于成本低，可比乙炔节约 40% 的费用；安全性提高了，因为它们的燃点比乙炔高（分别为 490～510℃ 和 408～440℃），爆炸范围小（指发生爆炸时，燃气在空气中体积分数，分别为 2.3%～9.5% 和 2.2%～8.1%）和安全距离小（分别为 1～2 m 和 5 m）；切割挂渣状况有改善；割缝小等优点。而燃烧热值和火焰温度较乙炔低的缺点，则可用改进割炬，加大氧的供给，在燃气中加入添加剂等方法解决，成为目前推广的新技术项目。

以氧－乙炔切割为例，无论是手工或是自动气割都是用割炬来进行的。割炬用来安装割嘴，并用调节氧和乙炔流量的办法，调节预热火焰，控制氧流量以保证气割的正常进行。割嘴喷出混合气流（预热火焰）和（切割）氧流，普遍采用的是两者同心组合在一起的，如环形和梅花割嘴，通常中心孔喷出切割氧，环孔或梅花孔喷出由混合气点燃的预热火焰，也有采用两者分离的非同心割嘴，用于进行薄板和较快速的切割，但现在已经用得很少。

为了提高切割钢板的速度，采用切割氧孔道为扩散形快速割嘴，可比普通直线型割嘴提高切割速度 20%～30%，但其切割面粗糙度增大。为此研制了高速精密割嘴，即在扩散型割嘴的扩散段前方设置了直线段，使超音速气流的边界层处速度分布均匀，与直线型割嘴一样，从而降低表面粗糙度，达到提高切割速度的要求。除射吸式之外，国家标准（GB/T5108—1985）还提供一种等压式割炬，这种割炬除供手工气割外，各种自动和半自动的机械化气割都采用这种割炬。

2）等离子弧切割　等离子弧切割是以高温高速的等离子弧为热源，将被切金属熔化及蒸发，同时用高压气流将熔化金属吹掉而形成狭窄切口的切割过程。等离子弧由于可切割任何黑色金属、有色金属、高熔点金属和其他切割方法难于切割的金属，如不锈钢、铝、铜、钛、钨、钼及其合金、耐热钢和铸铁等，还可切割非金属。在大多数情况下，与气割相比较切割速度快，生产率高。总的来看，切割质量也较高，切口较窄，较光洁，变形和热影响区小，因而获得广泛应用。

目前大量运用的压缩空气等离子弧切割，成本低、操作方便，适于切割 30 mm 以下厚度的碳钢，也可以切割不锈钢、铜、铝及其他材料。水压缩等离子弧切割一般在水槽中进行，工件在水下 200 mm 左右。由于水的作用，可降低噪声、弧光、金属粒子、灰尘、烟气和紫外线等，大大改善劳动条件，因而也获得广泛应用。

3）激光切割　利用激光束的热能量将被切工件切缝区熔化和气化，同时用辅助气体排除熔化物从而形成切缝的方法。按产生激光束的激光器有固体、气体和半导体激光器等，切割大都采用 CO_2 气体激光器产生的激光。切割用的辅助气体随被切材料而异，可使用惰性或中性气体；对一般金属的切割，则采用氧气，此时，激光束使金属预热、熔化到燃点，然后在吹出的氧流中燃烧，熔渣被氧流吹走，从而形成割缝。和氧—乙炔切割一样，大大地提高了切割速度和质量，此外，辅助气体还保护聚焦透镜免受污染。

激光切割的主要优点是切缝细，对一般低碳钢，其宽度可小到 0.1～0.2 mm，几乎没有熔渣，切口表面光滑，零件切后不需加工，即可使用，切口边缘热影响区很小，宽度仅 0.01～0.1 mm，淬硬区很小，性能不受影响；切割变形很小，切割时工件不用夹具固定，割口垂直，切割工件的尺寸精度高。目前限于设备条件，工业上还仅限于将激光切割头装在数控切割机上实现薄板的机械化自动切割。

4）水射流切割　利用压力达 200～400 MPa 的高压水，有时还加入一些粉末状的磨料，通过（蓝宝石或金刚石制造的）喷嘴喷射到工件上的一种切割方法。水射流切割可切割金属、复合材料、陶瓷、玻璃、塑料等。具有切口无挂渣、无热变形、无淬硬、无粉尘污染等优点，适于易燃、不耐热、不耐压的材料切割，目前我国尚在推广应用之中。水射流切割是一种极有应用前景的束流切割。

几种热切割切割速度的比较见表 7.1-14。

表 7.1-14　几种热切割速度比较　mm/min

碳钢钢板厚 /mm	氧－乙炔切割	等离子弧切割	激光切割	水射流切割
<1	—	—	<5 000	3 300
2	—	—	3 500	600
6	600	3 700	1 000	200
12	500	2 700	300	100
25	450	1 200	—	45
30	300	250	—	—
>100	>150	—	—	—

5）数控切割　近年来，焊接生产中的下料工艺有了重大进步，表现为热切割工艺和设备得到很大发展。热切割设备由各种小型的半自动机械、直角坐标仿形、光电跟踪仿形和发展到数控的各种大、中型全自动切割机。特别是微机控制的数控全自动切割机和编程机的发展和广泛应用，使划线、号料和下料三工序合并，使切割质量，包括零件的外观质量、尺寸精度、形位精度大为提高，为装配、焊接等后续工序的高质量提供良好条件，解决了某些难于机加工的弧形曲线外轮廓零件和大厚度（100～250 mm）钢板零件的切割加工，前者如链轮、链片等，后者如压力机架、机床床身、履带架等，使一些传统铸造构件被焊接构件取代。有的工厂对厚 6 mm 以上的全部或大部分钢材都采用机械化和自动化的热切割，打破了适于剪切的经济厚度定在 20～25 mm 以下的结论。许多产品的非焊接边缘也是采用机械化热切割，且割缝光滑，尺寸正确。由于配置了多把可回转的割炬，可一次切割出 X、K、V 等直线和曲线坡口。总之，数控切割在备料工艺中是一项重大的技术革命，改变了车间工艺流程和设备布局，根本改善了焊接件的质量，使整个生产的现代化、自动化和缩短工艺流程达到一个新水平。

数控切割是用编好程序的数据指令（如 NC 纸带、储存了程序和数据文件的软盘、或通过网络传输的数据）指挥切割机，以单割炬或多割炬对钢板上单个或多个零件自动连续，并按规定顺序和方向切割。单件生产通常按图样上零件的几何形状和数据在专门的编程机上进行脱机编程，生成指令。1987 年起国内一些单位开始研究，陆续有一批自动编程套料系统软件问世并投入使用，如太原重型机器厂、上海电站辅机厂等。整个系统一般分为编程、套料两大模块。

编程模块能够提供零件的生成（描述）、计算、绘图、显示、编辑、储存、打印和穿孔等功能，有的还具有指针动态式编译功能、三维零件的展开等，自动提供切割引入线。套料模块是在编程模块基础上，计算机利用专用软件在屏幕上进行排料设计。分人机和自动两种套料。前者通过人机交互方式，把多个零件通过平移、旋转多种手段，排在板材最合适位置上，达到最大程度利用板材的套料切割目的。后者则是自动从零件库提取与钢板面积大致相等的一批零件自动完成多种编排方案，显然它有很高的工作效率。



随着CAD在焊接结构设计中的采用，可望取消绘图板，使大部分或全部结构图都是AutoCAD图，充分利用CAD绘制零件工作图几何形状的描述，设计了CAD与编程软件的接口，进行数控程序的转换，从而生成自动编程套料系统软件，指挥切割机自动完成套料切割，这样既提高了生产效率，又进一步保证精度，提高了产品质量。

3.5 钢材边缘的加工

切割出料的金属毛坯在下列情况下还需进行边缘加工：为保证装配的精确度（焊接的或非焊接的装配）、为了去除不良的边缘（如气割的热影响区和剪切的冷作硬化区）、毛坯倒角和加工焊接坡口等。边缘加工的方法有车、刨、气割、碳弧气刨、铲等。

如圆筒形工件可用车床加工，直线边缘用刨床、铣床或刨边机加工，后者是焊接生产专用设备。对于要求装配精度高的圆筒形工件，在纵缝拼接后，进行断面边缘加工，一般都在车床上进行。直线边缘加工可在门式刨床上或专用于加工边缘的刨边机上进行。刨边机的刨削原理和刨床上进行金属切削加工一样，在刨边机上还可以刨出V形、U形、X形坡口，刨削坡口时一次只能加工一块钢板，如果只要求刨立边时，可把若干块钢板叠起来一次刨削（总厚度不超过40 mm)，能提高生产率。如将刨边机上的刨刀改为铣刀，只需走刀一次便可铣削好边缘，叠板厚度可达200～300 mm，大大提高了生产率。

按照规范机加工气割或机械剪切零件边缘时，其刨削量不应小于2.0 mm。采用机械加工方法可加工各种形式的坡口，如I形、V形、U形、X形及双V形等；但也可用热切割方法切割出坡口，如用多把割炬，一次即可切割出I形、V形和X形坡口。对于U形坡口也可用多割炬，通过调节中间割炬的切割氧压力，割出所需的弧形，最后切割钝边，可获得精度较高，且耗氧量少的坡口。图7.1-21为多割炬自动气割机气割V形和X形坡口的方法。

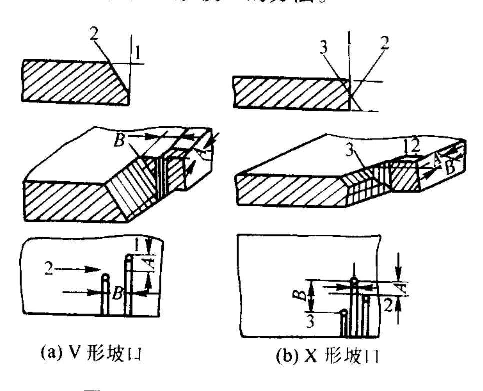


图7.1-21 氧－乙炔切割焊接剖口

实际上，生产中还广泛采用电弧气刨进行一定形式的坡口加工，特别利于双面焊清理焊根的工作，和在焊接缺陷修理时缺陷的开挖工作。碳弧气刨一般用直流电源，以碳棒作为电极，与工件间形成电弧。金属在电弧热作用下很快熔化，利用高压空气（一般4～6atm，1atm≈0.1 MPa）把熔化金属吹走，以达到切削金属的目的。用交流电进行气刨，电弧不够稳定，碳棒烧损严重，但当采用直流电源大电流进行气刨时，缺点并不显著，故交流电也完全可用于气刨，电弧气刨不但能切割低碳钢，低合金钢，而且可切割铸铁、高合金钢、铜、铝及其合金；还能开U形坡口和金属表面切割（如挑焊根等）。

此外，工件装配焊接以前，还要把靠近焊口边缘20～30 mm范围内钢板表面铁锈及油污等赃物清除干净。清除方法见6.1“焊前清理”。

3.6 钢材的弯曲及成形

在焊接结构制造中，弯曲及成形加工占有相当大的比重。制造某些焊接结构时，金属材料的80%～90%需进行弯曲及成形加工，如压力容器、各种化工石油塔、罐、釜的圆筒体，锥形或椭圆、球形封头，锅炉的锅筒，焊接管道，各种球形容器等。

钢材弯曲成形的原理是通过施加外力使钢材发生预期的塑性变形。它可以在冷状态下或热状态下进行，这主要取决于钢材厚度和弯曲变形的大小。钢材由于过大的塑性变形，引起冷作硬化，力学性能急剧变坏，因此钢材在冷状态下弯曲成形时，其曲率半径不应小于某一最小允许数值。否则必须在热状态下进行，通常当 $D/\delta>40$ 时，可在冷状态下进行，（D—圆筒的直径，δ—钢板的厚度）见图7.1-22。当 $D/\delta<40$ 时，必须热弯。

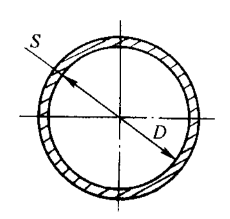


图7.1-22 圆筒示意图

卷圆：如罐车筒体、锅炉气包筒体的卷圆通常在卷板机上进行，卷板机有三辊和四辊两种，每一种皆有对称和不对称两种类型。如图7.1-23所示。

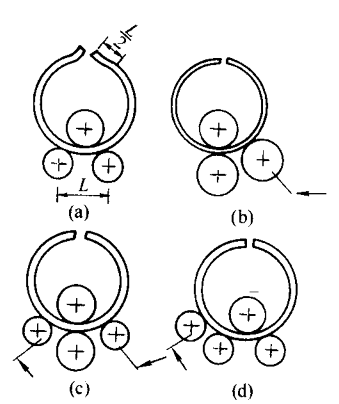


图7.1-23 三辊和四辊卷板机工作示意图

对称布置辊子的三辊卷板机，辊子的轴承固定在机架的两端，上辊子轴承可以单独或两个同时在垂直平面内移动，以便构成对钢板的压力和获得所要求的弯曲度。当上辊的中心和下辊的中心平行时，钢板就卷成圆筒形，而与下辊的中心成某一角度时，则卷成锥状。上辊外边的轴承可以拆下，以便从卷板机上取下已卷成圆筒形的钢板。这种卷板机的下辊是主动的，上辊依靠与钢板摩擦而转动。这种卷板机有很大的缺点：成形时板端头出现直边，直边的宽度大约等于两下辊中心距的一半，一般两端各有150～200 mm的直边卷不圆。为了解决这个问题，出现了如图7.1-23b、c、d的辊子布置形式，例如四辊卷板机，下辊主动，两侧辊在箭头方向能调节，上辊上下能略作调节以适应不同厚度的工作。钢板的弯曲是靠侧辊上升所产生的压力来实现的。在没有四辊卷板机时，可以利用预弯边达到卷圆目的。预弯边可以在各种压力机上进行也可以在三辊卷板机上利用模具进行板边预弯。图7.1-24将模具1放到下辊2上将钢板3端部放入模具

内，上辊 4 下降施压。钢板端部即可弯曲，模具的曲率比工件的曲率稍大一些，其厚应大于被卷圆钢板厚度的2～2.5倍。宽度必须超过两下棍间的距离。应该注意对模具经常检查曲率及调修，避免应用时间过长模具曲率改变出现误差。在卷板机上进行卷圆时，如已知钢板的弯曲半径 R，求出各棍子中心距离；或已知辊子中心距离，求出钢板卷成圆筒的半径时，可采用下列公式（参考图 7.1-25）

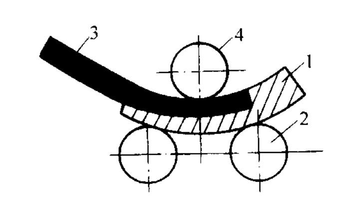


图 7.1-24　三辊卷板机上用模具预弯

1—模具；2—下辊；3—钢板；4—上辊

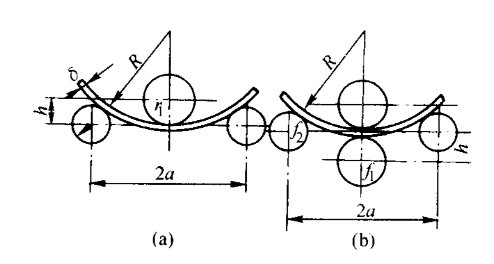


图 7.1-25　卷板机辊子尺寸和位置

1）三辊卷板机（图 7.1-25a）

$$h=\sqrt{(R+\delta+r_2)^2-a^2}-(R-r_1)$$

$$R=\frac{(r_2+\delta)^2-(h-r_1)^2-a^2}{2[h-(r_1+r_2+\delta)]}$$

2）四辊卷板机［图 7.1-25（b）］

$$h=r_1+R+\delta-\sqrt{(r_2+R+\delta)^2-a^2}$$

$$R=\frac{r_2{}^2-(r_1-h)^2-a^2}{2(r_1-r_2-h)}-\delta$$

假如上辊对下辊可以调节倾斜度时，倾斜度决定于钢板厚度（δ）和锥形圆筒两端弯曲半径的差值，可以用下面公式计算：倾斜度 =（h_1-h_2）/δ；式中 h_1、h_2 为钢板两端部上下辊子中心距。根据予设弯曲半径用三辊卷板机的公式求得 $2a$。在单件或小批生产中，卷圆是由小到大逐步反复进行工作的，把样板放在被弯曲工件的内部检查弯曲度，弯曲度和样板的间隙不得大于 1～1.5 mm。

对型钢（角钢、槽钢、工字钢、钢管等）弯成全圆或圆弧时，用专用设备进行加工，我国生产的 W24－2 型 3 辊型材弯曲机，能冷卷各种方钢、扁钢与型钢等。

在焊接结构中常遇到一些曲面零件，如锅炉、高压容器、化工容器的封头，汽车油箱、罐车罐体的封头等，这些零件一般是利用胎模在水压机（或油压机）上热压成形。

3.7　钢材的制孔

制孔的方法有钻孔、冲孔、割孔等。

1）钻孔　钻孔利用钻头在标有中心眼的点上进行切削加工，通常是在钻床上（摇臂钻或立式钻等）进行，用手工钻机可以钻 32 mm 以内的孔，在钻大直径的孔时，直接用大钻头会打滑，不容易定中心，需先用小直径钻头钻一通孔，再用大直径钻头扩孔到所需要的直径。对于精度和光洁度要求高的孔，钻孔后尚需精铰。在成批生产时，如果许多零件孔的布置和孔的直径相同，可以把钢板重叠起来进行，能大大提高生产率。

2）冲孔　冲孔是在冲孔机上或联合冲剪机上进行。冲孔过程和剪切过程相似。冲孔是用冲头和冲模来代替剪刀。冲头和冲模的切断部分作成圆形、方形或其他形状。冷冲孔时，孔边缘上的金属发生冷作硬化，因此重要的金属结构，需用扩孔的办法将硬化的区域去掉 3～6 mm。

图 7.1-26 冲孔用的冲头直径等于所需孔的直径 d；下模的直径 $D=d+$（0.05～0.1）δ。δ 为所冲金属材料的厚度（mm）。

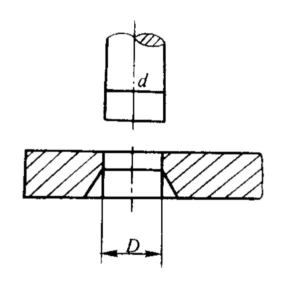


图 7.1-26　冲模示意图

冲头直径与冲模直径之间的间隙愈大。则变形扩展的深度愈大，而孔边缘的外形也愈坏。同时也要注意冲头的直径不能小于加工金属的厚度。冲孔的低碳钢厚度不可超过 25 mm。冲模一般用 T10-T8 碳素工具钢制造。

3）割孔　当孔径很大时，要用气割进行割孔。要求孔非常精确时割孔后进行切削加工。

为了便于了解和分析比较，兹将备料加工各工序的常用工艺方法，综合列于表 7.1-15。

表 7.1-15　备料加工各工序常用工艺方法

工序	加工对象	工艺方法	适用范围	说　明
矫正	钢板	手工	无机械设备或无适用的设备	应使用平锤垫锤
		钢板矫正机（平板）	根据设备特性可矫厚度 1.5～40 mm	可矫正剪切后的切口变形
		压力机	厚度 >40 mm 的钢板	水压机或液压机
	型钢	手工	无机械设备或无适用的设备	
		型钢矫正机	角铁、槽钢、工字钢	可矫正断面形状
		调直机（顶床）	断面大或局部弯曲	不能矫正断面形状
		压力机		
划线	钢板及型钢	划线、放样及号料	单件小批生产的零件成批生产的零件	

续表 7.1-15

工序	加工对象	工艺方法	适用范围	说　明
出料	钢板	手工剪	剪切厚度＜4 mm	剪切精度较差
		龙门剪	一般剪切厚度＜25 mm	
		圆盘剪	一般剪切厚度＜3 mm	
		冲剪	联合冲剪机一般冲剪小料大功率冲床可利用模具落料	
	型钢	冲剪 锯割	角钢、圆钢 各种型钢	
	钢板及型钢	气割	各种型钢及钢板	包括手工、半自动、自动光电及数控
		等离子切割	不锈钢、铝及难熔材料	
弯曲成型	钢板	手工	单件生产	
		卷板机	卷圆筒或锥形筒	卷板机有三辊及四辊
		水压机（油压机）	曲面成型（如封头等）	
	型钢	手工	型钢及钢管弯曲成形	
		型钢弯曲机	型钢弯曲成形	
		弯管机	钢管弯曲成形	
边缘加工	钢板及型钢	风铲	去除冷加工硬化层、边缘及坡口加工	精度较差
		气割		有自淬倾向的材料应考虑预热
		刨边机		精度高
		铣边机		
		立车		
孔加工	钢板及型钢	钻孔	根据孔的位置及直径可采用手提钻、立钻及摇臂钻	大量生产中采用多头专用钻床
		冲床	大量生产	孔缘有冷加工硬化层
		割孔	大尺寸或无精度要求	
表面及焊口清理	钢板及型钢	气体火焰	去除油污水分等	成本高
		喷丸或喷砂	去锈、去氧化皮	效率高效果好，但应防粉尘
		手砂轮或钢丝刷	一般用于焊口清理	劳动量大
		酸洗	去锈、去氧化皮、去油污等	注意劳动保护

备料加工中各工种工艺与设备的选用，一方面取决于结构件的形状、尺寸、批量以及与其他构件的连接要求（例如成型、制孔与边缘加工等）；另一方面则是由结构的装配、焊接工艺要求而决定的（例如连接边缘的刨边、坡口加工、和焊缝区的预处理等）。

4　焊接结构生产工艺分析

焊接生产工艺分析是编制焊接工艺过程、制定工艺文件、设计工艺装备和组织焊接生产的前提和基础。不经过全面详细地工艺分析和方案论证，所制定的生产和工艺过程是很难保证其技术与经济合理性的。

所谓工艺分析，是指在整个焊接产品正式投产前对其结构构造、材料和技术要求进行分析研究，提出问题及其解决方法。特别是对结构的关键部件要找出技术难点，明确关键工艺并采取保证质量的措施。工艺分析过程，也就是调查研究，提出问题和解决问题的过程。

生产工艺分析的明显特征是：在审查图纸和技术要求阶段，生产技术、组织管理和质量检测人员就应密切合作，精心分析，了解和掌握生产中可能出现的一切问题，把握其关键部件、生产难点、关键工艺以及必须采取的的关键技术、工艺、设备和工艺装备等，力求做到运筹帷幄之中，决胜产品投产之前。生产工艺分析的所有结论和决定，都将在生产准备工作中付诸实施、验证和试验，并进行适时和必要的调整、修正与补充，建立相应的技术文档和规章制度。在生产重要的新产品、新结构时，工艺分析尤其显得重要和必需。

4.1　焊接工艺分析原则

进行焊接工艺分析的总原则是：在保证产品质量，满足设计技术要求的前提下，争取最好的经济和社会效益。

保证产品质量，除在几何尺寸，各项性能指标都能满足技术要求外，还应注意产品的内在质量，使其在服役条件下具有长期寿命。例如，焊接结构的残余应力太大，在某些条件下（如低温或腐蚀介质）工作会提前失效。

保证经济效益，首先是降低产品的制造成本，降低生产过程中的材料和施工定额，降低劳动强度，改善生产安全和卫生条件等，开创先进、文明生产的局面。

进行具体焊接工艺分析时，应从下面三个方面着手。

1）工艺条件　即完成生产任务的技术力量和产品本身所具有的技术潜能。根据产品结构、数量、材料等特征，结合工厂的生产条件考虑拟采取的技术措施，以便能生产出合



格的产品。产品本身应具有先进性和实用性；工厂应能够生产并通过生产提高工厂的生产水平和技术力量，在生产活动中进行革新和增强实力。

2）经济性　在满足技术要求的前提下，估算新产品生产过程所需的基本费用（厂房、建设面积和投资等）和生产费用（原材料、动力消耗等），力求消耗少、回收快、盈利多。

3）劳保条件　采取各种安全技术措施，做到文明生产，保证环境卫生和生态平衡，把人身和设备事故率降低到最低点，这就需在生产管理与组织方面实现科学化和现代化。

按照上述原则进行工艺分析时，经常出现产品质量与生产成本相抵触，技术革新与生产管理组织相抵触等问题。在解决这些矛盾时，要调查研究，集思广益，提出各种方案进行论证比较，选择各方面兼顾的最佳工艺方案并付诸实施。

4.2　焊接工艺分析方法

工艺分析是制订切实可行的工艺过程的前提，工艺分析的过程，就是要在焊接结构的技术要求和它的生产实践之间找出矛盾，解决问题。分析的重点应放在焊接结构的装配和焊接工艺方面，并要找出其主要矛盾。在分析时从保证焊接结构技术要求和采用先进的工艺技术措施两个方面进行。

从保证焊接结构技术要求方面进行分析，既要保证焊接结构有准确的外形尺寸，偏差符合要求，又要保证优良的焊接接头质量，能适应结构工作要求。

4.2.1　保证焊接结构准确的外形尺寸

影响焊接结构外形尺寸的主要因素是焊接变形和残余应力。焊接变形使结构在制造过程中就出现尺寸超差现象，而焊接残余应力太大时，使得结构在使用中由于局部应力达到或超过屈服极限以及自然时效等因素的影响会产生二次变形而影响结构的准确尺寸和服役性能。此外，备料加工过程中加工方法和精度等，也都会影响结构的形状尺寸，因此，应注意处理下列问题。

1）根据焊接结构的整体构造和焊缝布置情况，判断每条焊缝及全部焊缝焊完后结构整体或局部变形的方向和大小，这些变形与技术要求的矛盾程度，应特别指出哪些焊缝是产生结构最后变形的主要原因，并对这些焊缝的技术处理提出妥善措施，如备料加工和装配方法及其精度等。

2）根据结构的整体构造和变形情况，考虑装配及焊接顺序和将构件划分部件进行装配焊接的可能方案，将结构整体装焊方案和划分部零件装焊方案进行比较论证后，采用最有利控制和减小焊接残余应力和变形的最佳方案。

3）从减少焊接残余应力和变形的角度出发，采用妥善的装配和焊接方法，规定具体的装焊顺序，控制应力变形措施，制订具体的焊按规范，施焊顺序和方向以及其他措施。

4）在保证减少焊接残余应力和变形的前提下，必须对劳动卫生条件，生产率和焊接操作位置及可焊到性加以考虑，以免影响焊接质量和生产成本。

4.2.2　保证优良的焊接接头质量

在分析焊接接头质量的高低时，既要考虑到对焊缝质量的确保，也要考虑到焊接结构工作条件所提出的特殊要求。工作条件不同，构件材料不同焊接工艺方法和技术措施也不一样。即使构件材料全部相同，对工作焊缝（受力）和联系焊缝的处理也不相同。容器类结构往往要求有较高的密封性，化工类结构要求有较好的抗腐蚀性，高温工作结构要求焊缝的化学成分与力学性能与母材相近或相同，铸铁结构则要求焊接接头（包括焊缝，熔合线和热影响区和部分母材）有良好的加工性能等等。

在通常情况下，“焊接质量好”是指焊接缺陷（如裂纹、气孔、夹渣、未焊透和咬肉等）满足技术标准要求，同时要有适当的焊缝形状系数（熔宽与熔深之比、一般为0.8～2.0）和凸出高度（一般为2 mm左右），接头和母材的力学性能要组配合适等等。在考虑解决这些问题时，需要综合运用结构生产、材料冶金和工艺方法等学科知识，一般从以下三个方面进行分析。

1）金属材料成分和性能　由于焊接热过程的作用和冶金反应的结果，焊缝与母材的成分不同，组织不同，因此性能也不一样。对于碳钢材料，将随着钢中含碳量的增高而使可焊性降低，焊接时容易产生气孔，结晶裂纹和延时裂纹，合金钢中的合金元素容易引起过热现象，使该区产生塑性差、韧性低的金属组织并可能导致延时裂纹。当焊接规范选择不当时，焊缝形状系数的恶化和熔合比例（母材和填充金属熔化量之比）不适合，也会使焊接接头各区性能不协调、承载能力降低或者在焊接中产生裂纹；焊接具有特殊性能的高合金钢时，如Cr13等马氏体钢和18－8等奥氏体钢，则易产生硬化和晶间腐蚀问题。总之为了保证接头质量，在制订焊接工艺时，须根据材料成分的不同、采取不同的技术措施。

2）工艺方法的特点　焊接工艺方法首先是根据结构与材料的特点进行选择的，即使是同一结构和材料，不同的焊接工艺方法，热源的性质不同，对熔池的保护方式不同，也会产生不同的问题。因此在确定焊接工艺时，要根据不同的焊接工艺方法，采取相应的技术处理措施，以保证焊接接头质量。例如：手弧焊时，电流过大会提高生产率，但会使药皮失去保护作用而产生气孔并增大变形和应力；用低氢焊条时，焊接区域清理不干净或焊条烘干不够，也会产生气孔等缺陷。埋弧焊容易产生气孔和较大的焊接应力变形，电渣焊使接头组织粗大，往往需焊后处理以保证接头性能。气体保护电弧焊接时，规范和操作不当可能破坏保护气氛而产生气孔等问题。为解决上述问题，除选择合适的工艺制度和规范参数外，还须进行必要的工艺试验，以保证良好的焊缝形状和可靠的内在质量。

3）焊接结构及构造形式　在结构设计方面，常常由于忽略了焊接连接的特点而将铆接或铸造结构照搬过来，导致结构和接头刚性过大，会使焊接区应力过大甚至直接引起开裂，不恰当的结构形式、接头类型、坡口参数和过高的技术要求，都会使焊接时产生焊不到、未焊透、咬肉、气孔、夹渣和裂纹，或者焊缝密集，受热集中，造成过大焊接应力并由此产生热裂或冷裂等现象，直接影响焊接结构的承载能力或使用寿命。

4.2.3　采用先进的工艺技术

采用先进工艺技术措施的目的是：采用先进的焊接工艺方法，组织生产过程的机械化与自动化，改革生产管理制度。

1）采用先进工艺方法　焊接工艺方法的先进性同焊接质量的高低一样，是有相对性的。一般说来，埋弧自动焊和半自动焊比气焊和手弧焊方法先进，而CO_2焊、氩弧焊、等离子焊则又更进了一步。但对具体焊接结构而言，究竟用那一种焊接工艺方法比较合适，需要从工艺条件、经济条件和劳保条件等原则考虑，仅根据焊接方法的先进性进行取舍，在施工中将会使其他加工工种和工序如备料加工、装配、检查等复杂化。

作为一个例子，图7.1-27为锅炉汽包示意图，筒身材料为20 G钢，壁厚90 mm。筒身纵缝需要焊接，根据汽包结构及材料情况，可以采用多种焊接方法，一般采用多层埋弧焊或电渣焊。两种焊接方法所要求的制造工艺相差很大，如表7.1-16所示。从表可以得到如下结论：

① 采用电渣焊，取消了机械加工和预热，使整个工艺过程简化约50%；

② 生产率提高约50%，如统计焊接一条纵缝焊机有效工作时间，设埋弧焊为100%，则电渣焊为44%；

③ 采用埋弧焊时，容易产生夹渣和气孔等缺陷，焊接应力与变形严重；而采用电渣焊时，焊缝质量稳定可靠，返修率由埋弧焊的15%～20%下降为5%；

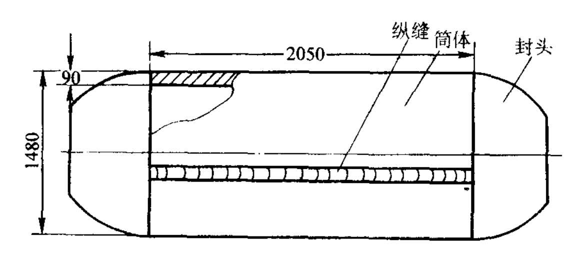


图7.1-27　锅炉汽包结构示意图

表7.1-16　锅炉汽包筒体纵缝焊接工序比较

多层埋弧自动焊		电渣焊	
工序编号	工序名称	工序编号	工序名称
1	划线、下料、拼接板坯	1	划线、下料、拼接板坯
2	板坯加热（1 050℃）	2	板坯加热（1 050℃）
3	初次滚圆	3	初次滚圆
4	剖口机械加工	4	气割坡口（在筒内焊接临时卡兰）
5	再次加热		
6	再次滚圆		
7	装配筒体（在筒内外焊接临时卡兰和引出板）	5	装配筒体（焊接引出板）
8	预热（200～300℃）	6	电渣焊
9	手工打底焊（从内部焊2～3层）		
10	在刨床上清除打底焊反面缺陷，并除去外面卡兰		
11	预热（200～300℃）		
12	外部焊缝（18～20层）焊接		
13	回火处理（焊后立即进行）		
14	内部焊缝（10～12层）焊接		
15	焊缝表面加工（除去内外增厚高）	7	正火并滚圆 焊缝表面加工

2）生产过程的机械化和自动化　在考虑实现工艺过程的机械化和自动化方面，要因时因地制宜，可以是整个工艺过程，即组织整个产品的机械流水线，也可以是某个部件或某一个工序的机械化或自动化。例如将手弧焊改为埋弧自动焊，生产率可以提高1.5～8倍，一般情况下，将部件装配和焊接的手工操作改为胎夹具操作全位置焊接后，生产率可以提高2倍以上。全部生产过程（包括备料加工、装配焊接、运输清理等工种工序）机械化自动化后，生产率可以提高10～20倍以上，对工艺过程的这种革新，目的在于使产品的质量稳定，互换性好，工人劳动条件得到改善。

工艺过程的机械化自动化，在成批和大量生产中是必须考虑的问题。但对于单件小批量生产的产品，则须在方案比较后做出选择。否则，将会使成本增加，生产周期延长，生产服务工种工序增多，只有对产品品种有类似性、胎夹具及工艺装备有通用性且经济效益好的产品可以例外。

3）改革结构形式和创造先进生产经验　为了革新生产工艺和创造先进生产经验，往往需要对焊接结构或构造形式进行改革。这种改革必须有生产和使用经验为基础，改革后的产品必须进行试验和工作考验。

如图7.1-28所示为液化石油气瓶及与之类似的干粉灭火器、液化石油气瓶。改进前的工艺过程是：压制封头-滚圆筒身-焊接纵缝-装配-焊接两端环缝。改进后的工艺过程是：压制杯形封头-装配-焊接环缝。结构改进使得工序和焊缝减少了，装配简化了，生产率大有提高，产品质量比较稳定。改进后的主要缺点是杯形模具费用高，压机台数增加。由于产品批量较大，取消了滚圆工序及设备，考虑到改进前的蝶形封头也需占用压机，因此改进后总的生产成本大为降低，原材料有所节约。

值得注意的是：结构和构造形式的改进，往往是组织生产工艺过程机械化和自动化的前提。车辆厂在生产黏油罐体时，在构造方面将丁字形接缝改为十字形接缝，将罐体底板的搭接焊缝改为对接，创造了大拼板和整体滚圆先进工艺，为组织罐体流水生产创造了极为有利的条件。必须指出：作为生产单位，对设计图样的任何修正和更改，均须取得原设计单位的认可和审批，否则后果责任自负。

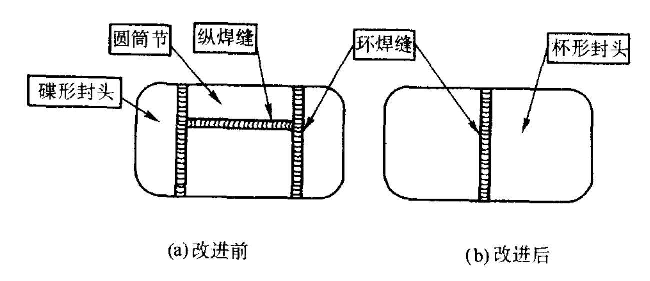


图7.1-28　液化石油气瓶改进工艺示意图

4）生产组织与技术管理问题　生产组织与技术管理的现代化、科学化，直接关系到产品质量与生产率，这一点越来越在生产实践中突出起来了。目前所进行的经济体制改革，其中重要的一环是生产管理组织和质量管理组织的改革。由于有关问题已在企业管理科学著作中有详细论述，这里仅对焊接工程全面质量管理的内容作简要介绍。

全面质量管理（QC）的基本内容包括以下几个方面：

a）制定先进的质量标准并以文件的形式体现在每一道工序中；

b）建立最佳施工程序（常以方框图表示）；

c）制定明确的岗位责任制；

d）对各种焊接工艺方法的焊工进行严格的专门培训，对其进行考核，要求持证上岗；

e）大量采用各种先进的轻型焊接和切割用辅助工具以保证焊工的操作条件和劳动强度都是最适宜的。

上述各项中质量标准和焊工培训是QC体系中的核心，全部内容都是焊前准备工作，都是在工艺分析之后确定的，它占全部焊接施工量的70%，在此基础上进行装焊施工，可获得高效率、高质量的产品。

图7.1-29显示了焊接工艺分析的内容、方法、步骤、顺序与结果，在具体分析工艺时，可结合工厂具体情况、产品特征及生产经验等灵活进行，要求全面细致，但须简明扼要，条理清晰。工艺分析的结论和结果，均须以工艺文件或

工作命令形式，报请总工程师或技术厂长审核批准后，下发至各职能部门付诸实施。

4.3 方案论证与生产准备

（1）生产工艺方案论证

在整个工艺分析过程中，都在不断地针对具体的构件和制造方法进行着工艺方案的论证与选择，因此，最后的生产方案仅仅是各个优化工艺方案的综合与认可而已。所谓方案论证，是指对一个工艺问题、要提出几个解决办法或方案。对这些方案进行比较和筛选，把其中符合实际，能保证质量，经济效益较好的一个作为投产的方案，这就是工艺方案论证。表 7.1-16 汽包纵缝焊接工序比较即为焊接工艺方案论证的例子。

当所提出的几个工艺方案都能保证产品几何形状、尺寸精度和焊接质量要求（这些条件是工艺方案得以成立的基础）时应如何选择其中一个方案作为比较合适或最优方案呢？这就需要从经济合理性和劳动条件方面进行比较筛选，把质量、生产率和经济效益都好的方案作为认可方案，应当强调指出，工艺方案的经济合理性是确定该方案能否给予“认可”的主要准则。

在拟定工艺方案的经济合理性时，应考虑以下各项指标：

1）基本投资数额（包括原材料费、设备折旧费，基建折旧费和动力费等）和投资回收期限；

2）劳动生产率的增长倍率；

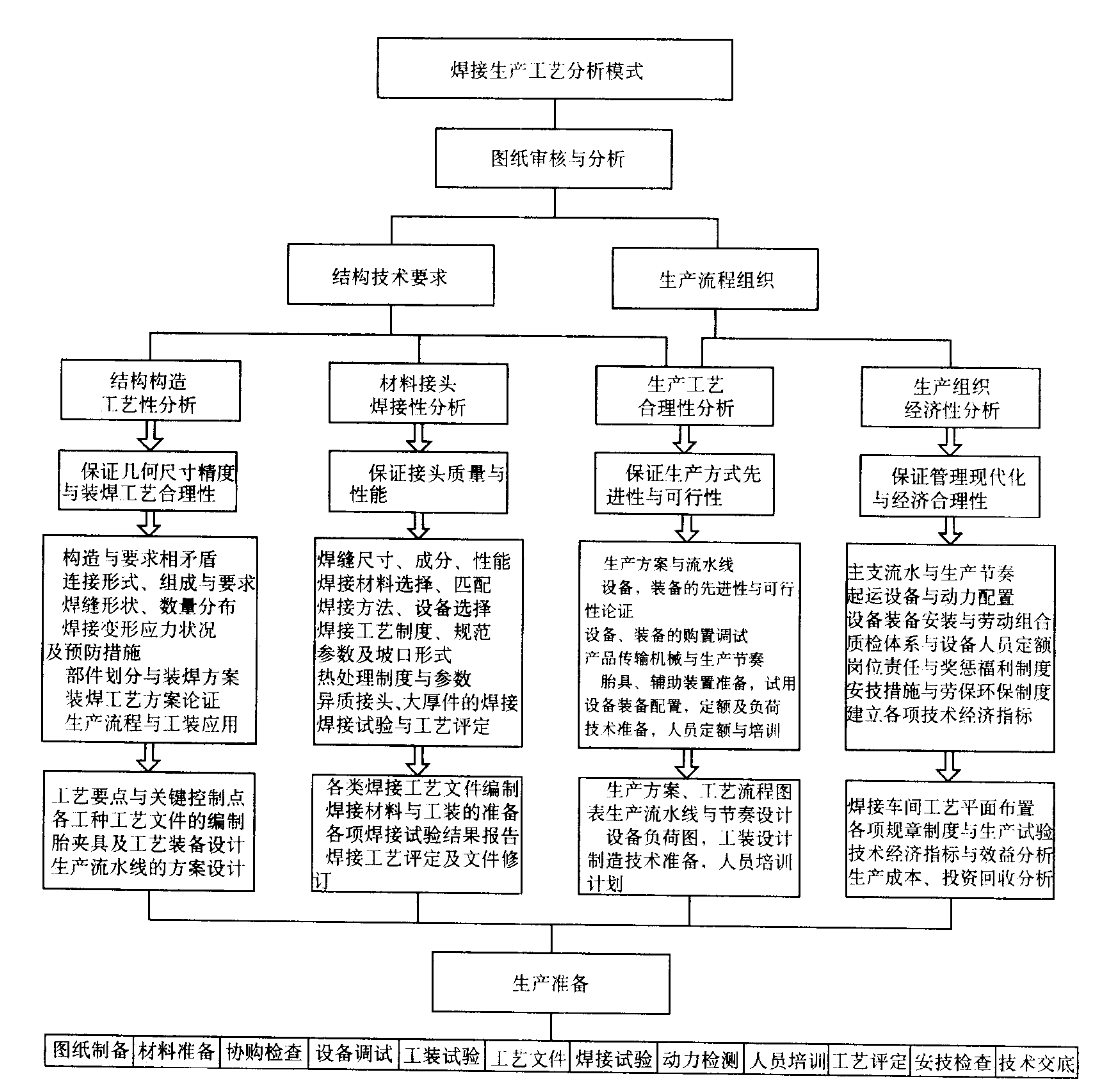


图 7.1-29 焊接工艺分析流程图

3）劳动量的降低和节省技术工人的数量（包括其技术等级、基本工资额等）。

4）工段或车间面积节约数额。

5）工胎夹具和辅助设备的数量和成本。

6）劳动条件的改善和工作安全性的提高。

将以上各项费用综合之后，以一年或一定期限为准、折算出每件产品的成本（元/件或元/吨），成本越低，该工艺方案的经济性越好，劳动条件和安全性等因素有时不可能以投资额计算时，则须作定性或定量比较。

关于投资回收期限，一般为 1～3 年。对于自动化生产工艺方案，回收期超过 5 年者是不合理的。西安某显像管厂是自动化机械化流水生产线，1983 年当年投产当年盈利就是一个较好的例子。

当各工艺方案或产品生产方案经过分析论证和筛选，或者经过修改补充被确认之后，还须经过一定的审批程序，即可开始进行生产前的准备工作。

（2）生产准备

生产准备工作，是根据被审批的产品生产方案（以各种



形式的生产指令或工艺文件形式下达）分别进行各方面的准备工作，并在一定时期内限期完成。生产准备工作的主要内容如下。

1）图样准备　焊接结构生产的主要任务是按照图纸制造出产品，因此是生产准备工作中的首要环节。在进行结构工艺性分析中，应该对图纸已进行了审查和修改，包括对技术要求的修改和确认；现在则须将正式生产用的图纸及技术要求按生产实际需要数量和技术存档等需要数量来进行复制，使各个生产岗位和施工人员均有图可循，除上述外，尚须考虑到旧图更换，外部索取和交流所需的数量。

在各施工图上，应按国家或各部有关标准，标出产品及其部零件的代号、图号、材料、质量、加工精度和技术要求等。

2）材料准备　包括原材料、焊接材料及其类型、规格和性能、成分的复核与确认，外协件、标准件的采购、储存、订货及加工等。如果材料准备不全或不能及时供应，将会使生产活动受到严重干扰。

3）设备准备　包括对现有设备的检查维修和新添设备的安装、调整和试车等。有时还须为设备配置辅助工具或机械装置。在生产正式开始前，各类设备均须经过试车或试生产，务求工作正常和性能良好。

4）工艺文件准备　各种工艺文件的名称、内容、格式、数量须按照生产方案和工艺流程分别编写，一般情况下编制工序卡就可以了；如果是大批量生产，生产节奏以分秒计算时，工艺文件则须编制出工步甚至动作。对于大型焊接结构且周期较长者如船舶、飞机或火车车箱、桥梁等，编制到工序卡即可。

5）工艺装备准备　包括各种工胎夹具及机械装置。其中有些可用系列标准件，但一般均须按照工装设计任务书提出的要求进行设计和制造。工艺装备设计任务书是在工艺分析之后提出的，它将根据结构或部件的轮廓及构造确定装配或焊接时应具有的运动类型、数量、运动速度、结构刚度、加工精度及技术条件或技术说明（包括装配、焊接顺序，焊接变形预防或减小要求以及每个部件在该装置上所占用的全部时间等）。至于装置的具体结构构造，定位夹紧元件的类型和运动实施方法等均由设计者去酌情处理。事实表明，为了使工装适用性良好，通常都是由工艺过程的编制者来主持设计或亲自设计，以保证工装能满足产品工艺过程的要求。

6）人员配备及训练　在生产实际工作中一名技术人员可能负责几项产品的生产，但对于一项重要产品或常年生产产品，其生产工艺的各个环节均须有专人负责，并设有焊接责任工程师主管产品质量，人员培训及考核等。对压力容器等重要产品的重要焊缝或焊接新方法新工艺的应用，都要对焊工进行培训和考核，只有合格持证的焊工才能允许其参加正式生产。

7）能源动力检查　是指水、电、风、氧、乙炔和焊接用保护气体等能否保证生产需要，线路是否畅通，是否新建或补充等。

8）生产面积布置或调整　如果更换产品，则须根据新的产品工艺路线调整或调度生产设备，辅助设备，起运设备等；如果是新建或扩建车间，则须对车间生产平面布置进行设计和施工。

生产准备工作是焊接工艺付诸实施的关键，这一工作是相当艰巨并要求细致的，对焊接构件生产而言，生产准备的关键工作是焊工培训和工艺装备的设置。

4.4　提高劳动生产率

任何一项工艺技术措施的提出或实施，总是围绕提高产品质量和劳动生产率而进行的，“质量就是生命，时间就是金钱”这句话之所以深受企业活动家们的赞赏，正是因为它包含了相当的客观真理。无需赘述关于质量保证问题，但对于劳动生产率的提高问题，有必要再做一些补充说明。

所谓劳动生产率，是指每个人为向社会提供更多的产品而服务，或者说在相同的时间里和以往的生产相比，能够创造更多的财富。具体表述是：一个生产工人在一个单位劳动时间内（小时或劳动日、或月、年）所生产出的产品量（件数或吨数）或财富值（元、万元）。提高劳动生产率的基本途径，不是靠增加劳动强度或延长工作时间，而是改变劳动的方式方法。一个国家是否富强，人民生活水平能否提高，国家与国家、地区与地区之间所以会有差别，可以认为其主要原因是劳动生产率的高低。

美国学者伯纳母在1973年曾经提出：在工业生产中，劳动生产率的四个基本因素如下。

1）产品设计合理　如果产品零件数减少，将相应地减少材料消耗、工胎夹具、加工定额和人员定额。因此结构应尽量简单，零件类型品种应尽量减少，大量选用标准件。产品的标准化。系列化设计是提高生产率的另一重要因素，因为这种系列化生产可以降低成本，容易组织机械化自动化生产，工人技能熟练，质量易于保证，工装类型数量减少，累积性效果更大。我们在进行结构构造分析时，着眼于结构的工艺性，有时对其做必要的修改，目的之一即上述原因。

2）生产方式先进　采用先进的设备、工装、工具、自动流水线和合理的平面布置，工业机器人和电子计算机的应用是提高生产率必不可少的因素。

3）工作人员具有较高的技能和效率　不断地对各类人员进行培训和知识更新，这种培训不应是一时一事的，要尽可能使其对新的工艺方法和技能进行不断的学习和运用；另一方面，生产管理部门应该在分配、福利、保健等方面给工作人员以鼓励和关怀，使其对工作更有热情和兴趣。政治和技术训练与物质福利的有机结合问题，是与提高生产率息息相关的，赏罚严明，重奖重罚，是充分调动工作人员积极性的关键措施，

4）生产量和人事结构　生产量越大，劳动生产率也越高。事实表明：同一个产品，在大批量生产的工厂里，每台产品的成本要比从事小批生产工厂的成本低，这就直接证明了劳动生产率高所带来的经济效益。

另一方面，工厂生产人员和非生产人员〔包括技术人员、管理人员、辅助人员（起运工、装卸工，清洁工等〕比例一定，若产量提高一倍，生产人员也需增加一倍，而非生产人员仅须少量增加如辅助工人等。但工程技术人员，管理人员和其他人员可能根本无须增加，这就等于增加了这些非生产人员的劳动生产率一倍。由此可见提高生产量是提高生产率的关键之一，这一观点，已经为一些实业家和管理干部所理解。

关于提高劳动生产率的具体措施，下述各项可供参考。

1）开展长远的系统性研究　要做长远的有计划有系统的研究探索工作，而不要只顾眼前的研究方法，这是提高生产率具体措施的一项准则。把时间和精力放在最有价值但不一定是最显眼的项目上。把所要研究的工作或事物（对象）分割成许多可以理解的局部，每次只对一个局部提出问题并进行研究。对所研究的局部反复提出三个问题：

① 能不能取消这一局部?

② 能不能与别的局部合并?

② 能不能用更简单的东西来取代它?

例如把生产过程划分成最基本的单元，一直到工位、工步、直至动作，对每个单元加以分析研究，决定是否予以取消，合并或改进，最后重新组成一个效率更高的工艺或工序。



2）要使措施尽快见效　为了落实某项具体措施，可将有关专业人员暂时调离本职岗位组成专门小组以解决该项特定问题。当问题牵涉到各方面的专业知识时，这种方法特别有效。例如审查设计，此法即可在最短时间内找到成本最低的制造方法。

3）执行价值分析法则　对一件产品或一种体制或一种改革措施进行深入分析研究，判定该项事物所完成的功能与其成本是否相当。这种方法除具有很大节约效果外，还可能导致设计出全新产品或根本改变某一事物的本来面目。价值分析法则的另一作用是功能鉴定，即在分析的基础上可以取消其多余的功能，或者会以更便宜的材料、更简单的工艺方法完成相同功能的产品。这种方法既可以用于设计、制造产品，也可用于行政或技术管理工作。

4）确立竞争性对比制度　即将其他厂家所生产之同类产品购进解剖或作对比性试验分析，找出各家产品的优缺点。取人之长，补己所短。把别家产品的特点或突出零部件的结构构造尽可能用到自己的制造工艺过程或产品上。在这里，重要的是了解别人已经做了什么，目前正在做什么工作，从而把握动态和发展方向。倡导由生产管理人员、工程技术人员和生产工人组成三结合式的新产品研制小组（或技术革新小组），用优劣对比法研制自己的新产品，从而在降低成本，提高生产率和产品竞争力方面，取得显著而且快速的效果。应当指出，采用对比分析并将其定为制度，不能认为是工业间谍行为，而是优秀企业家或技术创新者应当具有的普通常识。

5）生产管理计划化、科学化　作为高级技术人才，无论从事科研、生产或提供服务，都有三个主要环节：生产、监督、计划。其中计划管理功能对提高劳动生产率是最主要的因素。由专门人员成立独立组织，专心致志研究提高生产率问题，他们优先考虑问题的根据应是节省开支的潜力，成功的可能性和成功的时间，只要方向正确，即使是小发明，小改革、甚至是零敲碎打的计划，有时也会产生意想不到的效果。当然任何一项计划或措施，都应有科学的依据。要建立优先考虑的原则，在最重要的项目上狠下工夫，绝不能西瓜芝麻一把抓。

寻找和确定提高生产率途径的最好时机是在工艺分析阶段。当产品正在设计、程序正在制定、新厂新车间正在建设或机构正在组织时来着重研究提高生产率的问题将会有最大的效果。物尽其利，贵在速成，若想不断地得到新的设计或工艺思想，就必须使新的设计或工艺思想尽快付诸实施。这一方面在全局上，整体上起激励鼓舞作用，是树立样板；另一方面，对开拓者或设计者本人来说，一旦做出样品，他即可把思想和精力从一个问题上解放出来，并会更有信心地投入另一项工作中去。从策略上看，生产管理人员或组织者应该鼓励专门小组或更大范围的有关人员，使每个人都为提高生产率和降低成本出谋划策，广泛涉猎，梦寐以求。

积极采用各方面科研最新成果，为提高生产率和降低成本，凡行之有效的途径和具体措施，均予采用。例如，相当长时期以来，车间里的设备装备均涂以令人感觉沉闷的暗灰色，影响工人生产情绪。当将这些设备分别涂以令人兴奋和明快的色彩如绿色、铁锈色、红色、黄色时，使生产人员情绪饱满而有信心，产品质量和生产率均有所提高，其他如厂房墙壁的颜色、清洁卫生情况等，也都有类似影响。

总之，提高劳动生产率已成为一门专门科学，是衡量一个单位或国家民族进步的指标之一。在具体计划和行动中，惰性是提高生产率的敌人，而积极行动则是其盟友。

4.5　桥式起重机主梁生产工艺分析

产品制造工艺分析过程就是发现矛盾并寻求解决矛盾的途径，而焊接结构的制造过程，又恰恰是矛盾贯穿其始终的。因此，“在各个矛盾的总体上，即矛盾的互相联结上，了解其特殊性，而且只有从矛盾的各个方面着手研究，才有可能了解其总体。所谓了解矛盾的各个方面，就是了解它们每一方面各占何等特定的地位，各用何种具体形式和对方发生互相依存又互相矛盾的关系，在互相依存又互相矛盾中，以及依存破裂后，又用何种具体的方法和对方作斗争”。在上述思想指导下，对桥式起重机主梁的结构、构造、焊缝分布及技术要求等方面作简要剖析。

桥式起重机主梁结构如图7.1-30所示。

起重机主梁的主要技术要求如下。

1）主梁的长、宽、高都有一定的公差要求；

2）主梁在垂直平面内要求有 $L_K/750\sim1\,000$ 的上挠度，在水平平面内的挠度（即旁弯）应不大于 $L_k/2\,000$；

3）腹板凸凹不平（即波波变形或失稳）应小于4～6/1 000；

4）主梁制造完毕后其扭曲变形值应不大于B/300。

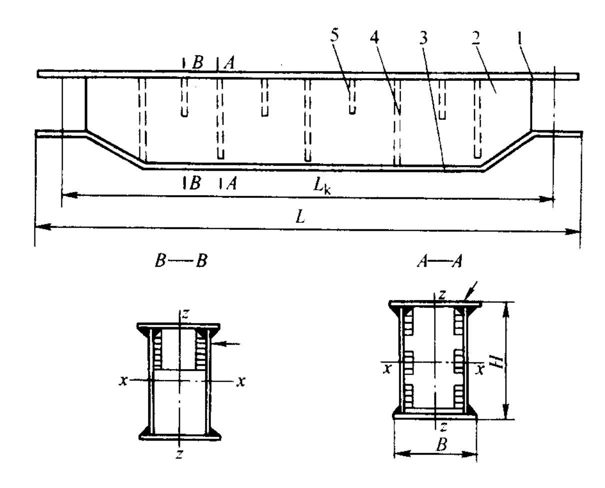


图7.1-30　起重机主梁结构示意图

1—上盖板；2—腹板；3—下盖板；4—大肋板；5—短肋板；L—梁长；L_k—跨距；H—梁高；B—梁宽

4.5.1　主梁的主要技术条件分析

1）主梁上部平面将安装轨道，起重小车在轨道上移动，因此主梁的上平面是工作平面要保证其水平度，其高度公差可往下超差，因此要求不严。主梁的宽度公差只要在全长一致，要求也不高。主梁的长度方向，由于纵、横向焊缝收缩的结果，将产生缩短，这会影响大车架的装配。在没有或缺乏确切的经验数据时，可在大车架总装时按实际需要切长。因此长度方向的公差要求是不难保证的。上盖板与左右腹板的连接要保证垂直度以消除附加应力。

2）主梁构造形状并不复杂，但因其长度大，上、下盖板及左右腹板需要拼接。盖、腹板的接缝不能在同一截面内，并且要避免在长度中心线和长、短肋板位置上；盖板的拼接焊缝要注意保证质量，特别是受拉翼缘（即下盖板）的接缝要求必须焊透、无裂纹及严重咬肉等缺陷。由于主梁长度大，相对刚度较小，在装配与焊接中容易产生变形。因此，除要求零件的备料加工要有一定的精度外（特别注意大小肋板的宽度尺寸及上边缘与两侧边的直角度），还必须选择合理的装配-焊接方案和恰当的焊接工艺措施，以保证主梁几何尺寸的要求。

3）主梁截面的焊缝分布对称于 z-z 轴，对 x-x 轴而言，焊缝集中于上部，将由于焊缝收缩而产生下挠，这与主梁要保证上挠的技术要求正好相反，这是主梁制造的关键问题，而且是必须予以确保的重点工艺问题。

焊缝虽对称于 z-z 轴，由于施焊顺序的影响，将产生水平挠度（旁弯）；当最后焊接主梁的四条外缘焊缝（主焊缝）时，也将由于焊接顺序的先后不同而会在垂直或水平平面内产生挠度和使上下盖板边缘产生角变形，长短肋板和腹板焊缝的变形结果，也将引起腹板的局部变形（在腹板偏下部将产生失稳变形）。

主梁装配－焊接工艺如果处理不当，将会产生各种变形形态，控制变形就成了主梁制造工艺的核心问题并由此得出系列工艺难点和提出控制工艺。

4）75 t 以下的起重机，由于刚度小，主要是变形问题；100 t 以上的起重机主梁，钢板厚度较大，结构刚性相应增大，特别是处理上、下盖板的拼接接头时，要注意因焊接应力过大而导致裂纹。

5）焊接方面，对主梁四条主焊缝可采用埋弧自动焊，肋板与腹板的焊接条件较差，截面尺寸较大时，可考虑用半自动焊或 CO_2 焊代替手弧焊，当技术条件要求四条主焊缝焊透时，须考虑相应的防烧穿工艺措施。

6）起重机主梁一般都用高塑性、焊接性能良好的优质低碳钢或低合金结构钢材料，通常板厚不大，相对刚性较小，因此材料的可焊性问题不大。焊接材料的选择方面，不存在特殊问题。除重型起重机外，焊接残余应力问题并不突出。在一般情况下，工艺分析的主要任务是解决焊接变形问题；但若残余应力过大，将影响使用寿命。

4.5.2　主梁的焊接方案

起重机主梁的上平面是工作平面，而长短肋板又与上盖板和左、右腹板相连。因此，装配－焊接主梁时，只能以上盖板的上平面作为支承基准面，其下平面作为肋板和腹板的装配基准。此即所谓“倒装法”。

起重机主梁的构造特点还决定了首先要将主梁装配成“门”形，待内部肋、腹板焊缝焊完后，再装配下盖板，最后焊接四条主焊缝。

装焊“门”形梁时，可有两个方案，如图 7.1-31 所示。其一是整体装焊，其二是边装边焊。工艺过程如下。

整体装焊方案（Ⅰ）在焊接①处焊缝时，由于焊缝距截面重心较远，变形较大，将使主梁有较大的下挠度，这是不希望的。而边装边焊方案（Ⅱ）在焊接①处焊缝时，由于截面重心距上盖板较近，焊接产生的下挠较小，有利于保证技术要求，当主梁高度较大时，采取整装方案焊接①处焊缝困难较大，因此应用方案Ⅱ制造主梁是一项关键工艺。

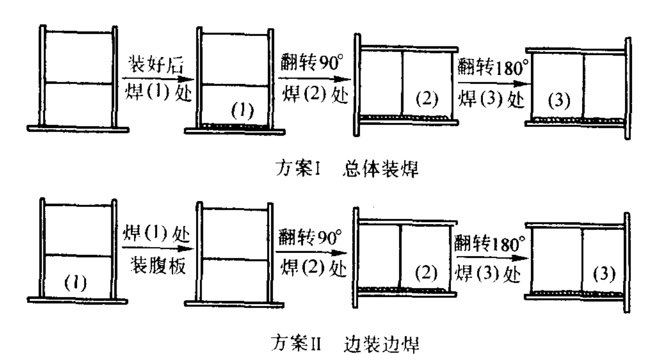


图 7.1-31　装焊“门”形梁的两个方案

4.5.3　主梁上挠度的制造

保证主梁 $L_k/1\,000$ 的上挠度，是主梁制造的整个关键，现在通行的办法是预先将腹板制成上挠，装焊后即可使主梁获得上挠。制造腹板时，一种方法是将腹板分成几块梯形板，拼接之后即得到折线型上挠如图 7.1-32。另一种方法是将腹板拼接成整料，然后用气割按预先画出的曲线切割出上挠，如图 7.1-33 所示。

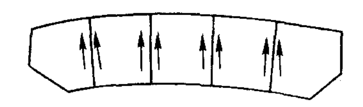


图 7.1-32　用多块梯形板拼接出上拱（箭头为焊接方向）

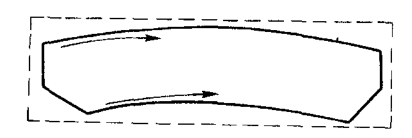


图 7.1-33　拼接成大板后，气割上拱

上挠度数值的确定是制造上挠的工艺控制点。如前所述，装-焊过程中产生下挠，因此，在下料时上挠的数值要放大以弥补焊接产生的下挠。腹板下料时的挠度数字按如下公式计算

$$f_x = \frac{4f_{\max}x\,(L_K - x)}{{L_K}^2}$$

式中，f_x 为主梁从某一端算起任意点的挠度值；$f_{\max}$ 为主梁最大挠度，即主梁长度中点的挠度标高；x 为从主梁某一端算起的任意距离；L_K 为主梁的跨度。

根据生产经验，在制造时将下料挠度放大为

$$f_{\max} = L_K\,(1.3 \sim 1.5)\,/1\,000$$

装焊后挠度允许偏差应不大于 20%。

当“门”形梁装焊完毕后，如发现上挠度值不符合要求时，可在装下盖板前将“门”形梁中间或两端垫起来，给以适当外力，使其挠度达到要求时再装配下盖板。由于“门”形梁的刚度远较下盖板为大，所以在强力弯曲“门”形梁时其挠度值要大于技术要求数字，以弥补在下盖板装点完并松掉外力以后整个梁的挠度将由于弹性变形（回弹）而损失的部分上挠度。

4.5.4　腹板失稳变形

主梁在装焊过程中，腹板区会产生失稳（或波浪）变形，变形部位约在腹板高度 2/3～3/4 处（接近下盖板），这种变形太大时将影响起重机的承载能力。因此一般要求腹板凸起（或凹下）的最大值不超出腹板厚度或不大于 6 mm/m。

产生腹板失稳变形的原因如下。

1）焊接外部四条主焊缝时，腹板上、下边缘处于拉应力状态。中间区域为压应力区。焊接长短肋板与腹板焊缝时，也在腹板下方产生压应力区。这些压应力叠加的结果，超出腹板失稳的临界应力时，就会产生失稳变形。

2）在两块长肋板之间的腹板，其四周都有焊缝，这些焊缝纵向收缩的结果，也会使该区中心偏下部分产生凸起或凹下，形成波浪变形。

为了控制失稳变形，腹板在总装前要进行平整，长、短肋板要进行三面刨边以求宽度一致和保证上边两角为直角。在设计方面，在短肋板下面往往加设水平肋杆，此外在装配下盖板时，对焊好的“门”形梁施加弯矩如使下缘受拉，下盖板装点后将减小波浪峰值，但不能消除。在主梁全部装焊以后，如果波浪太大，只能用火焰矫正。

4.5.5　主梁的水平旁弯

主梁在装成“门”形梁后，须焊接腹板、肋板及上盖板三者之间的全部内部焊缝。腹肋板间先焊的一侧，由于焊缝横向收缩的结果，使得先焊的一侧缩短，产生弯曲，凹向先焊的一侧。除了减小焊接规范使变形减小外，有一定的旁弯将有利于大车架的总装焊，因为对双梁桥式起重机而言，两根主梁装成“Ⅱ”形后。主梁外侧还须装焊走台支架，由于



焊接走台支架所产生的水平旁弯正好与主梁本身焊接所产生的旁弯方向相反，控制好的时候，可以消除这一变形。因此，在装配大车架时，只要注意主梁的旁弯方向，保证弯曲数字在允许误差范围内是不难的。如果两主梁旁弯数值过大或差值过大，可用火焰调节。

4.5.6 主梁扭曲变形

主梁的截面和焊缝分布基本上是对称的，但在制造过程中，往往由于技术处理措施不当．加以主梁长度大，相对刚度较小，扭曲现象常有发生，其变形情况如图 7.1-34 所示。

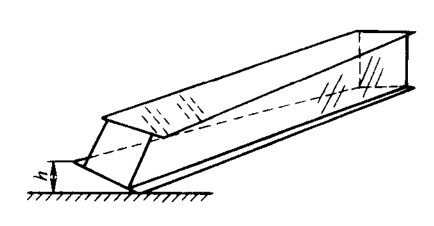


图 7.1-34 大梁扭曲及火焰矫正示意图

某厂在制造 300 t 锻造起重机时，主梁扭曲变形达 60 mm，而且矫正相当困难。对于引起扭曲的原因还不太清楚，其可能的因素有：

1）焊接四条主缝时，施焊顺序及方向不合理如图 7.1-35 所示。结果形成不对称的变形和造成扭转力矩而引起主梁扭曲。

2）装配和焊接时支承基准不平，造成主梁在扭曲状态下施焊，结果也会出现扭曲。

3）肋板与上盖板和腹板相连接的三个边不是直角，肋板与上盖板装焊后在总长度方向上形成扭斜等都可能使主梁出现扭曲。

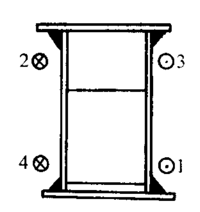


图 7.1-35 主梁主缝的焊接顺序及方向不合理

一旦主梁产生扭曲时（一般不允许大于 5 mm），行之有效的矫正方法是用火焰矫正，在火烤的同时将两端翘起的部分用螺旋杠杆住下压，效果将更好。用火焰矫正时在腹板上烤 45°斜线，如图 7.1-34 所示，自主梁两端向中间进行，火焰仅能在翘起的腹板上加热。

4.5.7 上盖板波浪及主缝焊透问题

目前主梁制造的通行工艺是先装焊肋板与上盖板，然后装焊腹板，在焊接肋板与上盖板时将产生波浪变形如图 7.1-36。

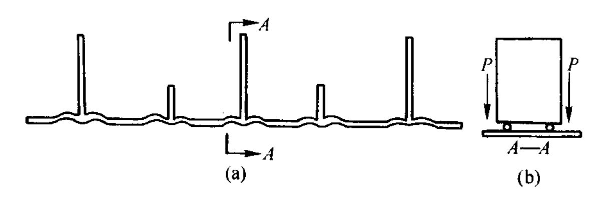


图 7.1-36 上盖板的波浪变形

上盖板的波浪变形太大，将影响轨道及腹板的装焊，为了减小附加弯矩和挤压应力，一般规定波浪峰值不得大于 3 mm，这种波浪变形实质上是焊接肋板时由于角变形所引起的，与腹板失稳变形是两回事。为了控制这种变形，除适当减小焊脚尺寸、采用小规范外，焊接时可在焊接区附近将上盖板压紧在支承基准面上，待焊缝冷却再松去压力。一些工厂在装配肋板时，将 1～1.5 mm 的钢丝垫于盖板与肋板之间（见图 7.1-36b)，焊接收缩时将使肋板下沉而减小盖板的角变形，这一措施有一定效果。

“门”形梁装焊完毕后，须将下盖板放在支承基准上与“门”形梁装配，之后焊接四条外部主要角焊缝。这四条焊缝承受由载荷所引起的工作应力。质量要求较高，除允许有少量分散的气孔或尺寸较小的夹渣外，对裂纹和严重未焊透必须铲根重焊。

关于焊透问题，有人认为厚板结构如焊缝受拉应力，可计算焊缝截面而不一定焊透，如受压应力作用，两元件须紧密接触或用剖口以保证焊透而使应力传递良好；对于只能一面施焊的下盖板与腹板焊缝，则须将腹板剖出半 V 形坡口使之焊透。这一论述符合起重机主梁工作情况、因此主焊缝应该焊透。但也有人认为主梁上缘焊缝可不焊透，下缘焊缝受拉，要求焊透。并且指出：下缘单面坡口的角焊缝，其未焊透允许有 25% 且不大于 4 mm。管道（一般压力）制造方面则认为未焊透仅允许存在 15～20%，为确保起重机主梁工作性能，一般要求主梁主缝焊透率应达 80～85%。

为了实现焊透，在腹板下缘开 50°半 V 形坡口（厚度小于 10 mm 时不开剖口），施焊时将焊头倾斜 15～25°，使最大熔深处于下盖板上，以免烧穿腹板，在背部可以加陶瓷垫。

4.5.8 主梁制造工艺要点

根据上述分析，得出主梁制造工艺要点如下。

1）主梁挠度是通过腹板下料预制上挠实现的，最好用样板自动气割，两条边不能同时切割时应先割下缘，气割后进行刨边或打磨平整，两腹板的挠度应相一致。这是主梁的关键工艺，必须确保。

2）肋板是装配腹板的基准。其上、左、右三边应刨边，并保证左右两条边垂直于上端边线，这是备料加工工艺的控制点。

3）肋板与上盖装配时要全长拉线检查，以防扭曲，焊接时要全长压紧上盖板，以免盖板有波浪变形。腹板与肋、盖板装配时要注意间隙均匀，以减少变形。

4）“门”形梁焊接后要测量挠度与旁弯。在装配下盖板时，注意利用这一工序控制变形（挠度及波浪失稳变形）。

5）每块肋板与上盖板的两边焊缝，焊接方向应相反，全长方向的肋板与盖板焊缝应从中间向两端施焊，焊完冷却后松去上盖板压紧器。

“门”形梁也应从中间向两端施焊。

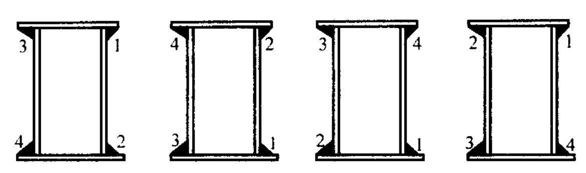
主梁外部四道主缝的焊接次序应根据挠度及旁弯程度决定：挠度数值不够时，可先焊下缘两条主缝。两条缝的焊接方向应相同，第一条焊缝应处在水平旁弯拱起的一侧。焊接上缘两条主缝时焊接方向也应一致。但可与下缘的两条主缝施焊方向相反。利用四条主缝的焊接方向和次序来调节主梁的挠度和旁弯，见图 7.1-37 所示情况，四条主缝焊接是必须控制的关键工艺。

6）由于焊接收缩而引起的长度损失的准确数值难以确定，一般生产中每 10 m 留出长度余量 10～28 mm。在两根主梁制造完毕后，按要求长度进行测量和临时切长。

7）挠度、旁弯和失稳变形不符合公差要求时，在焊后进行火焰矫正是行之有效的技术措施。但火矫部位和每一部位的重复加热次数尽量减少，以免引起复杂的应力状态而影响使用性能。一般情况下在同一部位重复加热次数应不超出三次；在主梁下盖板及腹板下部区域应力求避免火矫，以利保持主梁挠度数值的稳定性。

关于桥式起重机主梁及起重机整体结构的制造工艺过程和相关问题，应参照国家标准《桥式和门式起重机制造及轨





(a) 上挠偏大、旁弯右拱时采用　(b) 上挠偏小、旁弯右拱时采用　(c) 上挠偏小、旁弯适中时采用　(d) 上挠过大、旁弯适中时采用

图 7.1-37　主梁四条主焊缝的焊接顺序选择方案

道安装公差》(GB/T 10183—1988) 和有关行业标准的相关规定执行。

5　焊接工艺评定与规程编制

对于给定的焊接结构，经过焊接生产工艺分析，并考虑企业的实际情况，(如焊接工艺所要求的特殊条件能否满足；如企业现有设备与采用的工艺方法改用新工艺的可能性；工厂技术水平及工人素质；环境和劳动保护及综合经济效益等) 选定焊接工艺方法之后，制定全部工艺参数，最终形成工艺规程和工艺文件。

但是所拟定的工艺规程是否能提供合乎技术要求的焊接接头，则需要通过焊接工评定或焊接试验来确定。因此，焊接工艺规程是经过对焊接结构的生产过程进行分析后的焊接要求，通过"工艺评定进行确定，编制指导生产的焊接工艺卡。由焊接技术人员及焊接工程师制定。

重要的焊接结构如压力容器、锅炉、能源与电力设备的金属结构、桥梁、重要的建筑结构等，在编制焊接工艺规程之前都要进行焊接工艺评定。通常，企业接受新的结构生产任务，进行工艺分析，初步制定工艺之后，就要下达焊接工艺评定任务书，拟定焊接工艺评定指导书，根据规定的焊接试件、试样，进行检验、加工、试验，测定焊接接头是否具有所要求的性能。然后作出焊接工艺评定报告，编制焊接工艺规程，作为焊接生产的依据。现行国家强制性标准，如劳动部颁布的《压力容器安全技术监察规程》、《蒸汽锅炉安全技术监督规程》等，都对焊接制造的相关结构规定了进行焊接工艺评定的要求，所以它是表明施焊单位是否有能力焊出符合规程和产品技术条件的焊接接头，并验证所制定的焊接工艺是否合适。

焊接工艺评定试验不是金属材料的焊接性试验，它是在材料焊接性试验之后，产品投产之前，在施焊单位的具体条件下进行的；试验用的试件必须反映产品结构的特点，其形状和尺寸由国家标准统一规定；焊接试件所用的工艺为准备采用的焊接工艺；评定的内容是对用该工艺焊接的接头的使用性能进行评定，其中主要是力学性能；评定接头质量的标准是国家有关法规和产品的技术要求。

焊接工艺评定的最终目的是使产品的焊接质量获得可靠保证，其工作量一般都很大。为了做到用最少的评定工作量就能涵盖整个产品的焊接工艺，一方面要掌握标准中的各项规定，其中注意评定规则、替代范围、试验方法和合格标准；另一方面要分析产品结构特点，尤需注意那些明显影响焊接接头使用性能的重要因素。如母材金属和填充金属的类、组别，材料厚度范围，各种焊接接头的焊缝形式，可能的焊接位置等。因为改变任何影响使用性能的因素，都须重新进行焊接工艺评定。

5.1　焊接工艺评定程序

在对待生产的焊接结构进行了焊接生产工艺分析之后，能够确定在焊接生产中遇到的各种焊接接头，对这些接头的相关数据 如材质、板厚 (管壁厚度)、焊接位置、坡口形式及尺寸、焊接方法等进行整理编号，进而确定要进行焊接工艺评定的焊接接头。一般来说，根据现行的文献标准，焊接工艺评定的程序可以归纳如下。

5.1.1　编制"焊接工艺评定指导书"

对于要进行焊接工艺评定的接头，通常由焊接工程师编制焊接工艺评定指导书。其内容包括以下几个方面：

1) 结构名称、接头名称、文件编号；

2) 母材的钢号、分类号和规格；

3) 接头形式、坡口及尺寸 (简图或施工图)；

4) 焊接方法；

5) 焊接参数及热参数 (预热、后热及焊后热处理和其参数)；

6) 焊接材料 (包括焊条、焊丝、焊剂、气体等)；

7) 焊接位置 (立焊时还须包括焊接方向)；

8) 焊前准备、焊接要求、清根、锤击等在内的其他技术要求等；

9) 编制的日期、编制人、审批人的签字。

具体焊接工艺评定指导书和评定报告的格式，可按 JB 4708—2000 行业标准执行。然而编制焊接工艺评定指导书是一项需要运用专业知识、文献资料和实际经验的工作，编制的正确和准确性将直接影响焊接工艺评定的结果。

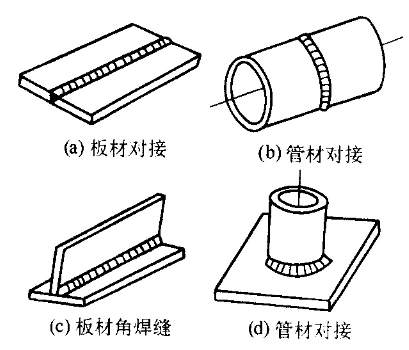
5.1.2　试件的准备与焊接

根据制定的焊接工艺指导书，由焊接工程师或技术人员根据有关标准的规定，进行焊接试件的准备与焊接，主要内容包括如下几条。

1) 按标准规定的图样，选用材料并加工成待焊试件；例如，根据钢制压力容器焊接结构特点，焊接工艺评定用的试件主要有如图 7.1-38 所示的几种：板材对接焊缝试件，管材对接焊缝试件，板材角焊缝试件，管子与板材对接焊；

2) 使进行焊接工艺评定所用的焊接设备、装备、仪表处于正常工作状态，值得注意的是焊工须是本企业熟练的技师或持证焊工；

3) 试件焊接是焊接工艺评定的关键环节之一。要求焊工按焊接工艺评定指导书的规定认真操作，同时应有专人做好实焊记录，它是现场焊接的原始资料，是焊接工艺评定报告的重要依据。



(a) 板材对接　(b) 管材对接　(c) 板材角焊缝　(d) 管材对接

图 7.1-38　对接焊缝试样形式

5.1.3　试件检验与测试

对焊接好的试件需要进行各种检验和性能测试，主要包括焊缝缺陷检验和力学性能试验两个部分。

1) 对试件进行焊缝的质检，对接焊缝的试件，需进行外观检查、无损探伤，对角焊缝试件，进行外观检查，然后切取金相试样，进行宏观金相检验；但规定断口试验的试样是使其根部受拉并折断，检查断口全长有无缺陷。对于T形接头的焊缝，除进行上述项目的检验外，还要求进行力学性能检验，是用除接头形式不同而其他参数相同的对接接头的



对接焊缝试件进行的。此外，还有耐蚀堆焊层和堆焊层的试件、试样的检验，螺柱焊的检验等。送交试件时，应随附检测任务书、加工试样的图样，注明检测项目和要求并妥善保存各项试验的报告。

2）对于焊缝缺陷检验合格的试件，按标准规定进行力学性能试验包括拉伸、弯曲（面弯、背弯和侧弯），有的还包括冲击、硬度试验。各种力学性能的试样尺寸和实验过程可以参考相关标准进行。图7.1-39表示了板材对接试样的力学性能取样方法。

5.1.4 编制焊接工艺评定报告

在完成了各项检测后，焊接工程师汇集所有试验记录和试验报告，可以编制"焊接工艺评定报告"。它实际上也是评定的记录，故其内容包括了焊接工艺评定指导书的内容，所不同的是，所有项目不是拟定的，而是实际工作的记录，例如母材和焊材附上质量证明，实际坡口形式和尺寸、施焊参数和操作方法，应记录焊工姓名和钢印号，还有报告编号、指导书编号、相应的焊接工艺规程编号等，最后应有评定结论，即使不合格也要作报告，并分析原因，提出改进措施，修改焊接工艺指导书，重新进行评定，直到合格为止。评定结束，将评定报告或评定记录，连同全部的资料做为一份完整的存档材料保存。

5.2 焊接工艺评定的规则

各类焊接工艺评定标准都规定了基本的焊接工艺评定程序或规则。除一些细节外，这些规则大致相同。

1）焊接工艺评定是制定焊接工艺规程的依据，应用处于正常工作状态的设备、仪表，由本单位技能熟练的焊接人员用符合相应标准的钢材、焊材焊接试件，进行各项试验，并应于产品焊接之前完成。标准规定某制造厂进行的焊接工艺评定，只适用于该制造厂。

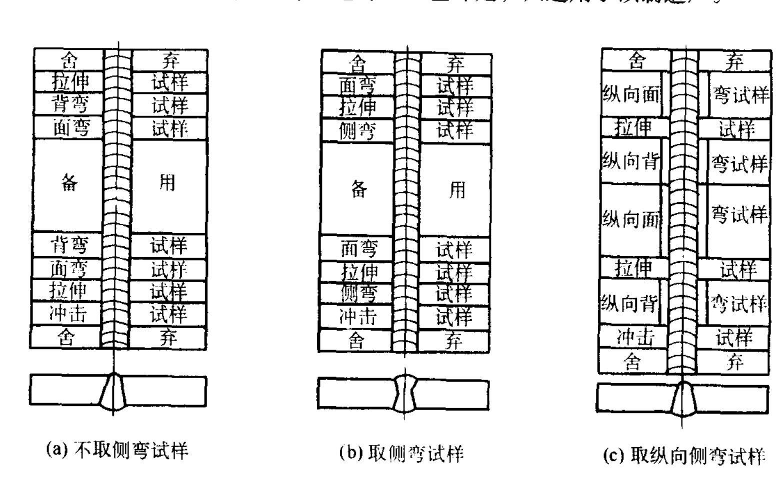


图7.1-39 板材对接焊缝的取样位置

2）当改变焊接方法时，应重新进行焊接工艺评定。对一条焊缝使用两种或两种以上焊接方法时，标准规定了相应的评定方法。

3）焊接工艺因素分为重要因素、补加因素和次要因素。重要因素是指影响焊接接头拉伸和弯曲性能的焊接工艺因素；补加因素是指影响接头冲击韧性的焊接工艺因素；次要因素是指为对要求测定的力学性能无明显影响的焊接工艺因素。当变更任何一个重要因素时都需要重新评定焊接工艺，当增加或变更任何一个补加因素时，只按增加或变更的补加因素增加冲击韧性试验。变更次要因素则不需重新评定，但需重新编制焊接工艺规程。由于焊接工艺因素相当多，而且同一工艺因素对某一焊接方法或焊接工艺是重要因素，对另一焊接方法或焊接工艺可以是补加因素，也可以是次要因素。各标准都制定工艺评定因素表。为了减少评定的工作量，将众多的母材及不同的厚度分成不同的类、组别，规定了相互取代的条件，评定时应参照标准执行，防止重复评定，又不致漏评。

4）对应各种焊接接头和焊缝形式，标准规定了对接焊缝、角焊缝试件和耐蚀层堆焊试件；也可以将对接焊缝分为各种形式坡口的对接接头和非I形坡口的T形接头，另外还增加了不锈钢复合钢制压力容器的工艺评定方法。

5）全部力学性能试验、无损探伤检验、化学分析试验等均需按国标规定进行。

5.3 焊接工艺规程的编制

焊接工艺规程，有时也称为焊接工艺卡。从广义的角度两者是相同的，从细节来说，焊接工艺规程要更详细一些。对于给定的焊接结构进行焊接工艺分析，工艺方案、工序流程图的确定，车间分工明细及有关工艺标准，资料等是进行焊接工艺规程设计的主要依据。但更重要的是焊接工艺评定报告，这是焊接工艺规程编制的基础。

以制造焊接结构为主的公司、工厂或车间，根据积累的实际生产经验（大量的焊接工艺评定结果）编制通用焊接工艺规程，其中规定了常见的不同材料、不同焊接工艺、不同接头（厚度）的焊接工艺，供生产中选用和执行。而对每一产品都要制定包括焊接工艺在内的专用的工艺规程。焊接工艺规程所包括的基本内容和焊接工艺评定报告相差不大，所不同的是焊接工艺规程是针对某一个焊接接头而言的。具体编制时，参考焊接工艺评定报告及相关标准的规则规定进行。

6 焊接结构的装配与焊接

6.1 焊前清理

焊前清理是清除焊缝边缘的铁锈、氧化皮，油污等和去除由于机械切割，熔化切割所产生的毛刺、熔渣、飞溅等。目的是为了保证焊接接头的质量，避免焊缝中出现气孔、夹渣等缺陷。因此，焊前清理有着极为重要的意义。焊口及焊丝的清理，对铝，锆、钛等材料的焊接质量尤为重要。

1）用风动或电动砂轮机、钢丝刷等清理工具 这是工厂目前最常用的方法，其特点是方便灵活。但由于手工操作，生产率不高，劳动强度较大，并有一定的噪声。近几年出现了一些高效率的机具，如气刮铲、针束除锈器等。

① 气刮铲 也称轻便气动扁铲打渣机，CZ2型气刮铲



内部采用内圆板分配阀结构，当压下手把上开关，压缩空气进入内圆板分配阀时，随着阀片的上下运动，压缩空气依次给气缸中的活塞上下供气，使活塞上下快速运动。当活塞朝下运动时，冲击铲针对工件表面进行清理。气刮铲也可以开坡口，去焊渣，清除飞溅和毛刺等。

CZ2型气刮铲的主要技术数据如下：冲击频率33次s^{-1}；气体耗量0.20 m^3/min；使用气压0.5 MPa；冲击功2.5 J；质量2 kg；气管内径用快速夹头ϕ10 mm，用固定接头ϕ7 mm。

② 针束除锈器　也称气动针束打渣机，XCD2型针束除锈器采用无阀类结构。当压下手把上的弹性开关时，压缩空气经节流阀进入气缸，由于气缸与活塞上的特殊气路，使压缩空气轮流分配于活塞两端的气腔，推动活塞作前后快速运动。当活塞向前运动时，冲击中间活塞，中间活塞将冲击运动传给头部29根直径为ϕ2 mm的清渣除锈钢针束，钢针根据工件表面的凹凸情况，在不同的深度上不断地打击工件表面，达到清除焊渣、铁锈等目的。

XCD2型针束除锈器主要技术数据如下：冲击频率67次s^{-1}；气体耗量0.20 m^3/min；使用气压0.5 MPa；除锈针ϕ2 mm×29（根）；气管内径ϕ10 mm；质量2 kg。

2）喷砂或喷丸清理　这种方法是将SiO_2干砂或小铁丸，由专门的喷砂喷丸装置借助压缩空气将其急速喷射到金属材料表或焊接坡口处，使污物和氧化皮被打落。这种方法效率较高，清理也比较彻底。但是采用这种方法时，会散发出大量的尘埃，因此，必须将此工序设置在专门的场地或封闭的专用车间内。

常用清理除锈方法的效果比较见表7.1-17。

表7.1-17　常用清理除锈方法的效果比较

清理除锈方法	手敲	手磨	风动锤	风动砂轮	喷沙	喷丸
除锈速度/$m^2\cdot h^{-1}$	0.125	0.55	0.63	0.85	8	6

注：以上数据不包括辅助时间。

3）气体火焰表面清理　利用气体火焰的加热作用来烧烤金属表面，可以去掉油污和氧化皮，但这种方法消耗氧气和乙炔气体较多，成本高而不经济。

4）酸洗　将需要清理的钢板或构件浸入由耐酸材料制成的槽内，槽内盛有2%～4%的硫酸液以清洗铁锈。然后放入1%～2%的石灰液槽内，洗去钢板或构件上的硫酸。取出经干燥后，钢板或工件上留有一薄层石灰，它可防止钢板或构件表面以后的氧化。在焊接前再将这层石灰膜擦掉。

埋弧自动焊焊丝及气体保护焊的焊丝，如外表面没有涂防锈层，焊前也必须清理，是用焊丝除锈机上的钢丝刷和粉状混合清洁剂来清理铁锈及油污等。

6.2　结构装配工艺

焊接结构生产中装配是指利用定位器、定位焊或压夹装置将加工好的零件，按照图纸要求组装成部件或整体结构的生产过程。金属结构的装配是一项繁重而重要的工作。此项工作的劳动量约占结构制造总劳动量的30%～40%。

装配质量会直接影响焊接工艺和产品质量。例如：如果装配-焊接顺序不当，会对焊接质量和效率有很大影响，又如装配间隙大小不均匀，会影响自动焊过程的稳定，也会由于焊缝金属填充量的不均匀而引起意外的收缩变形等。随着焊接工艺趋向高度机械化与自动化，对装配的质量要求也愈来愈高。为提高装配工作的质量和生产效率，首先应提高零件的加工精确度，其次是必须加强生产管理工作，制订合理的装配工艺，并严格执行工序间的检验制度和零件的保管，交接工作等。

6.2.1　装配方法分类

（1）按装配精度分类

1）修配　用于单件小批量生产，生产率低，工人劳动强度大，且要求有较高的技术水平，如生产工厂对高炉炉体和铁路桥梁进行预装时，需边装边修。

2）选配　用于成批生产，它将各类工件按其制造公差之大小将工件分组分级，各属于相应组级的工件装配后，其公差将在所允许的范围内且能保证其后工序（如焊接）对装配质量的要求。选配工作应与检验工作相结合同时进行。

3）互换性装配　用于大批大量生产，同一种工件之尺寸公差极相近，可任意调换而不影响装配和产品质量。

（2）按装配工具使用分类

1）划线定位装配　零件按线印装配之后点固。用于单件小批量生产。划线定位装配工作较繁重，要获得较高的装配质量，必须有熟练的操作技术。划线定位装配一般在平台上进行；

2）定位器定位装配　用于成批生产，免除划线，生产率较高；

3）模胎具定位装配　用于成批或大量生产，后装零件之定位常以先装零件作为定位基准并同时使用机械化自动化定位器和压加器，故生产率大为提高；

4）利用安装孔定位装配　适用于带孔零件和结构预装或工地安装。

（3）按工艺过程分类

1）由单独零件逐步组装成结构　对于结构简单的产品可以是一次装配完毕然后进行焊接，当装配复杂结构时，大多数是装配与焊接工作相互交替进行。

2）由部件组装成结构　装配工作是由零件先组装成部件，焊接后再由部件组装成整个结构，并进行焊接。在成批，大批大量生产的复杂结构中大多采用这种装配方式。

（4）按装配工作地点分类

1）工件固定式装配　装配工作在固定的工作位置上进行，这种装配方法一般用在重型焊接结构产品或产量不大的情况下。

2）工件移动式装配　工件顺着一定的工作地点按工序流程进行装配。这种方式不完全限于用在轻小型的产品上，有时为了使用某些固定的专用设备，也常采用这种方式。在产量较大的生产中或流水线生产中通常也采用这种方式。

6.2.2　装配中的定位焊

装配时用定位焊和定位板固定零件时，其强度和刚度的要求是：从装配到焊接的运送过程中定位焊缝不能断开或超过规定的变形，并且有利于减小焊接变形。定位焊的位置和尺寸应不影响焊接接头和结构的质量和工作能力，不影响整体焊缝的施焊。因此，定位焊的焊道截面尺寸不宜过大，要尽量布置在基本焊缝所在位置，以便基本焊缝施焊后能完全重熔定位焊缝。定位焊缝要保证焊缝质量，应采用和基本焊缝相同的焊接材料、焊接参数和热参数。

装配工作中的定位焊，应严格遵守技术文件规定，装配精度应保证技术条件的要求。对已进行焊边清理工作的，应在48 h进行装配完毕。装配中的点固焊，其长度为20～30 mm，间距为300～500 mm，焊脚高应为设计高度的一半，且大于4 mm。为保证零件紧密应两面点固。点固焊应尽量少用，长焊缝的点固应从中间向两端进行，点固焊质量应与正式焊缝相同。

装配直径大于1.5 m以上的筒节或管道时，筒内应安置临时支撑，管道壁厚大于6 mm以上时，一般应有60°～70°的对接坡口。弯曲管道上的接口至开始弯曲处的距离应大于10 mm。



结构总拼装之后（部件应焊完），其纵向弯曲应≤L/1 000，构件两端横向位移≤3 mm，纵向位移≤5 mm。

在自动流水生产线上，为提高装配效率及精度，常用可动式或可拆式定位器及压加器联动的组合夹具并辅以样板或样杆定位。

6.2.3　焊接结构装配次序的确定

在焊接结构生产时，装配工艺与焊接工艺的关系非常密切，在绝大多数的情况下，装配与焊接是交叉进行的。因此，在确定部件或结构的装配次序时，不能单纯从装配工艺角度去考虑。

决定装配－焊接次序，首先是考虑对装配工作是否方便、焊接的可焊到性及方法；此外，是对焊接应力与变形的控制是否有利，以及其他一系列生产问题。恰当地选择装配－焊接次序是控制焊接结构的应力与变形的有效措施之一。例如，选择工字梁筋板的装配次序可有两个不同的方案：一个是将筋板与工字梁的翼缘板、腹板一起装配完毕后再进行焊接，这时翼缘焊缝对工字梁翼缘板引起的角变形是比较小的，但是四条较长的翼缘焊缝就不能采用自动焊接来完成，而在生产工字梁时采用自动焊接是合理的。为了解决上述矛盾，提高生产效率和改善焊接质量，应考虑另一个方案，即先不将筋板装配到工字断面上，待四条翼缘焊缝完成自动焊接后再进行。这样做的缺点是翼缘板角变形相当严重，为使变形减少，需要采取预先反变形来加以预防或者采取焊后再矫正的办法。

6.2.4　分部件装配－焊接法

这是比较合理的方法，它不仅适用于预先要分割成部件的各种焊接结构（如船体、海洋平台中的构件、铁路车辆的底架等），对于某些较复杂的结构，同样显示出了较大的优越性。

（1）分部件装配－焊接法的优越性

1）可以提高装配－焊接工作的质量，并可改善工人的劳动条件。把整体的结构划分成若干部件以后，它们就变得质量较轻、尺寸较小、形状简单，因而便于操作，如把一些需要全位置操作的工序改变为在正常位置的操作。从焊接角度来看，这些部件的焊缝容易处于有利于焊接的位置，可尽量避免立焊、仰焊、横焊，并且可将角焊缝变为船形位置，这就有利于提高装配焊接质量和改善劳动条件，也提高了劳动生产率。

2）易控制和减少焊接应力及焊接变形　焊接结构的焊接应力和焊接变形与焊缝在结构中所处的位置及数量有着密切的关系。在划分部件时，要充分地考虑到将部件的焊接应力与焊接变形控制到最小而无害。一般都将总装配时的焊接量减少到最小，以减少可能引起的焊接变形和应力。另外，在部件生产时，可以比较容易地采用胎夹具或其他措施防止变形，即使已经产生了较大的变形，也比较容易修整和矫正。这对于成批和大量生产的构件，显得更为重要。

3）缩短产品的生产周期　由于各部件的生产是平行进行的，避免了工种之间的相互影响和等候。据统计，分部件装配焊接时生产周期可缩短三分之一至二分之一，这对提高工厂的经济效益是非常有利的。

4）可以提高生产面积的利用率　分部件装配－焊接法可以减少和简化总装时所用的胎位数。

5）在成批和大量生产时可广泛采用专用的胎夹具　这是由于分部件以后可以大大地简化胎夹具的复杂程度，并且使胎夹具的成本降低。另外，工人有专门的分工，熟练程度可提高。

分部件装配焊接的优越性是能促使生产效率的提高，改善产品质量和工人的劳动条件。但是，分部件生产时更需要加强生产管理来协调各部件的生产进度，以保证生产的节奏，同时要求有较大的作业（生产）面积。

（2）部件的划分

部件的合理划分是发挥上述优越性的关键，划分部件装配—焊接时应从以下几方面来考虑：

1）尽可能使各部件本身的结构形式是一个完整的构件。要考虑到结构特点，便于各部件间最后的总装。另外，各部件间的结合处应尽量避开在结构上应力最大的地方，从而保证不因划分工艺部件而损害结构的强度。

2）要力求最大限度地发挥部件生产的优点，部件的选择应尽量合理，使装配工作和焊接工作方便，同时在工艺上便于达到技术条件的要求，如焊接变形的控制，防止因结构刚性过大而引起裂纹等等。

3）现场生产能力和条件的限制。主要是考虑到划分的部件在质量上、体积上的限制。例如在建造船体时，分段划分必须考虑到起重设备的能力和装配－焊接场地的大小。对焊后要进行热处理的大部件，要考虑到退火炉的容积大小等问题。

4）生产节奏的要求。在大量生产情况下，各部件的生产节奏应大于产品总装线上的节奏并应尽量减少部件生产流水线的数量。

6.2.5　装配工作中应注意的问题

1）机械加工在最后进行　许多焊接结构中的一些零件是需要机械加工并与其他构件精确配合（如：轨道连接面、孔等）。为了保证这些零件的精度（包括它们本身的和它们之间的尺寸精度），可靠的方法是先完成所有的装配及焊接工作，甚至在构件经过退火消除内应力后，再进行机械加工。这样的工艺过程可得到较高的精度及尺寸稳定性。但这种工艺过程的生产成本高昂，同时要求具备大型机床才能实现。当对构件中加工零件的精度要求不太高时，可以采用带有定位装置的装焊胎夹具，并选择正确定位基准、装配过程和焊接工艺来完成。这时为了保证加工零件的尺寸公差，除了应采用一个精确的、刚度较大的胎夹具加以定位以外，同时在装配过程中，应首先完成构件其他部分的装配—焊接工作，最后才加工零件，以避免焊接其他部分引起的变形使加工件的精度下降。

2）装配零件都是以其外缘（包括孔的边缘）为依据的例如，焊缝的装配间隙、零件的定位、零件间垂直度、平行度的测量与装配都是这样的。因此，装配所依据的零件外缘的粗糙度会直接影响装配质量。粗糙或不精确的零件外缘，例如手工气割的零件外缘，轧制钢材的内缘（角钢、型钢、工字钢、槽钢的翼板内缘、曲线部分等）都不宜于做装配的定位基面。

3）正确掌握公差标准　构件的装配定位质量对焊接影响甚大，也严重影响整个产品质量。为了使整个结构焊后达到质量标准，在制订装配工艺时必须注明结构的特殊要求及公差尺寸，并在生产中严格遵守公差标准。

4）装配后构件的尺寸应在所要求的公差范围内　当构件是由几个零件组装时，若这些零件都为正公差，组装成的结构尺寸应在最大公差值之内，当这些零件都为负公差时，组装成构件的尺寸应在最小公差值之上。这样，凡是零件在它们的公差范围内，组装成构件的尺寸就不会超出公差范围。否则，这些零件就没有互换性，只有采用选择配合才能满足要求，这对于成批和大量生产是非常重要的。

5）严格清除油、锈等污物　相互接触的部件表面及焊口两侧 50 mm 以内，在焊前必须严格除掉油脂，铁锈等污物，以确保焊接质量，同时，也应规定清理后允许搁置的时间。

6）对定位焊要求　定位焊所用的焊条应和焊接时所用焊条相同，按规定的焊接温度和焊缝尺寸及位置进行定位



焊，并且保证焊接质量。对于重要及特殊材料的结构，不得用大锤敲击及强制装配，也不得在工件上任意引弧和焊接临时性构件。

7）巧用胎夹具 为提高装配工作质量和工作效率，要采用装配胎夹具，并应特别注意装配后的构件能方便地从胎架上取出。

6.3 结构焊接工艺

金属结构焊接工作量占全部制造工作量的20%~30%，而工作质量的好坏则影响整个结构的工作性能，因而在构件焊接时应慎重考虑下列问题：

1）根据材料的焊接性、厚度和结构与接头刚度，选择焊接材料，焊接方法、顺序、规范和焊接位置（尽量用平焊位置和采用自动焊）；

2）检查结构的装配质量，清理情况，自动焊应安置引弧板与熄弧板并要妥善处理点固焊缝；

3）多层及双面焊接要检查剖口，间隙、焊接中要注意去渣和清根；

4）根据构件形式选择合理的焊接方法及机械化自动化焊接设备和工艺装备。

5）注意施焊时自然条件对焊接质量的影响，如风霜雨雪温度等，尤其对重要构件、大刚度接头和有淬火倾向的钢材；

6）焊后质量检查，如内外缺陷、尺寸公差和变形程度等。

厚度在16~30 mm的碳钢结构，在-10℃以上施焊时，可用优质焊接材料施焊；在-10℃以下应加热100~120℃之后焊接。当厚度大于30 mm时，对于容器类板结构，环境温度在0℃以下时要预热；对空腹或实腹结构，环境温度在-10℃左右焊接时应有挡风设备。

焊接结构生产的理想情况是焊后结构即能满足技术要求而不进行矫形和返修。因而施焊过程中控制焊接变形是一项最主要的任务。在生产中，常出现下述两种焊接变形：

1）焊接收缩变形 它使构件的尺寸缩小，生产中通过划线下料预留余量来进行补偿。余量大小参考表7.1-18数据处理。

2）因焊接引起之扭曲、波浪及弯曲变形—这类变形使产品性能降低，必需矫正和消除。矫正后的结构尺寸公差和残留变形应保证在设计技术要求之内（见表7.1-19、表7.1-20）。

为了消除或减少变形，除焊后采取各种措施如局部加热和加力外，在焊前和焊接过程中，可采取下列措施：

1）将不对称的结构装配成对称形状，焊接后再恢复结构原形；

2）加大构件惯性矩；

3）施加外力强制变形；

4）采用反变形法；

5）采用合理焊接顺序和方向，如对称焊接、不增大焊缝断面与提高焊速等措施。

表7.1-18 焊缝收缩量

结构种类	结构特点	焊缝收缩量/mm
实腹梁柱结构	断面高度<1 000 mm，板厚<25 mm	纵向收缩0.3~0.5/1 000（每条焊缝） 对接缝横向收缩1/1 000（每条焊缝） 每对加肋板横向收缩1.0
	断面高度>1 000 mm或断面高度<1 000 mm而板厚>25 mm	纵向收缩0.5/1 000 横向收缩0.5/1 000 肋板横向收缩0.5
格架式结构	屋架电视塔等轻型结构	对接缝横向收缩1~1.5/条 角钢搭接缝横向收缩0.25~0.5/条 工槽钢盖板对接1.0/条
	梁柱等重型结构	按实腹结构收缩量考虑
容器类板结构	δ<16 mm	纵缝横向收缩（周长减少）1.0/条 环缝横向收缩（高度减少）1.0/条
	δ>20 mm	纵缝横向收缩（周长减少）2.0/条 环缝横向收缩（高度减少）2.5~3.0/条

表7.1-19 结构一般尺寸公差

板、梁、柱及格架结构	全长宽度	≤1/1 000 mm且<10 mm
	局部宽度	≤1/1 000~100 mm且<4 mm
	平面错边	≤δ/10 mm且mm≤3 mm
	两件要求在同一平面内误差	≤δ/10 mm且≤3 mm
钢板、容器结构	直径公差及椭圆度	±0.01 D且≤20 mm
	法兰与筒体同轴度	≤0.004 D且≤10 mm
	筒节轴线偏移	同直径≤3 mm；不同直径≤10 mm

表7.1-20 长度一般公差

mm

长度	<100	100~250	250~650	650~1 000	1 000~1 600	1 600~2 500
公差	±2	±3	±3.5	±4	±5	±6
长度	2 500~4 000	4 000~6 300	6 300~10 000	10 000~16 000	16 000~25 000	25 000~40 000
公差	±7	±8	±9	±11	±13	±15



6.4　焊接热处理

焊接结构的重要承力构件，特别是合金钢的焊接，往往需要进行热处理以保证产品有可靠的质量和性能。

6.4.1　焊前预热

焊前预热的目的是减缓接头在焊接加热时温度梯度及冷却速度，适当延长在 800～500℃区间的冷却时间，改善焊缝金属和热影响区的显微组织，从而减少和避免产生淬硬组织，有利于氢的逸出并可防止冷裂纹的产生。根据不产生裂纹的最低预热温度建立了一些确定预热温度的计算公式，在局部预热条件下（气体火焰喷嘴，多喷嘴，电加热等）许多资料给出了根据板厚和材料裂纹敏感指数 PW 确定预热温度的方法。但这些公式和图线都有其应用范围，使用时应予注意。实际上，除依据母材成分、焊接性能、板厚考虑预热外，焊接接头的拘束程度、焊接方法和焊接环境等都应综合考虑，必要时通过试验决定。不同钢号（或不同工件如管座与主管、非承压件与承压件）相焊时，按预热温度要求较高的钢号与工件选取。采用局部预热时，应防止局部应力过大。预热范围为焊缝两侧各不小于焊件厚度的 3 倍，且不小于 100 mm，较厚工件（如大于 35 mm）的焊接接头预热时的升温速度应符合热处理升温规定。需要预热的焊件在整个焊接过程中应不低于预热温度，层间温度不低于规定预热温度下限，且不高于 400℃。当用热加工方法下料、开坡口、清根、开槽或施焊临时焊缝时，亦需考虑预热要求。

表 7.1-21 为常用钢号推荐的预热温度。

6.4.2　后热

对冷裂纹敏感性较大的低合金钢和拘束度较大的焊件，为使氢充分逸出，防止延迟裂纹，焊后应立即采用后热处理，其温度以 300～350℃为宜，恒温时间不小于 2 h（也可采用 300～500℃，保温 1 h；或按 JB/T 4709—2000 规定，200～350℃，保温时间参照焊后热处理表 7.1-22 中回火最短保温时间确定）。若焊后立即进行热处理，则可不做后热。许多试验表明，采用合适的后热温度，可以降低一定的预热温度。一般可降低 50℃左右，这在一定程度改善了劳动条件，也可代替一些重大产品的焊接中间热处理，提高生产率，降低成本。

6.4.3　焊后热处理

焊后热处理分为局部热处理、（整体）炉内热处理、分段热处理等。炉内热处理时因受限，热处理件不能一次整体入炉，可在附加条件下多次分段入炉。整体炉外热处理，即用适当加热方式，在炉外将工件整体加热进行的热处理和中间热处理。表 7.1-22 列出了常用钢号焊后热处理规范。

（1）焊后热处理的目的

1）消除或降低焊接残余应力，这将导致焊接结构抵抗应力腐蚀能力和结构尺寸稳定性的提高；

2）改善焊缝金属和焊接接头组织与性能；

3）促使残余氢逸出（有利于防止延迟裂纹，如 500 MPa 级且有延迟裂纹倾向的低合金结构钢）。在脆性转变温度以下工作的焊接结构，在焊后进行消除应力热处理，以减少结构发生脆性破坏的危险。

（2）焊后热处理工艺

1）进炉温度　焊件进炉时炉内温度不得高于 400℃，为了防止产生较大热应力，对于一些合金钢，进炉温度还要低些。

2）加热速度　加热速度的单位用℃/h 表示。焊件升温到 400℃后升温速度不得超过 5 000/t ℃/h（t 为厚度，mm），且不超过 200℃/h，最小可为 50℃/h。整体炉外热处理宜控制在 80℃/h 以下。

3）焊件温差　升温期间，加热区内任意长为 5 000 mm 内温度差不得大于 120℃。焊件保温期间，加热区内最高与最低温度之差不宜 > 65℃。整体炉外热处理在规定的有效加热范围内，焊件温差不超过 85℃。

4）升温、保温期间控制加热区气氛　防止焊件过分氧化。

5）冷却速度　焊件高于 400℃，降温速度不得超过 6 500/t ℃/h（t 为厚度，mm），且不超过 260℃/h，最小可为 50℃/h。整体炉外热处理，冷却速度宜在 30～50℃/h；

6）焊件出炉，炉温不得高于 400℃，出炉后在静止空气中冷却。焊后热处理一般为高温回火。

（3）焊后热处理注意事项

1）调质钢焊后热处理温度应低于调质处理的回火温度，不同钢号的工件相焊，焊后热处理规范和温度按要求较高的执行，但温度不应超过两者中任一钢种的下临界点 A_{c1}。

2）有再热裂纹倾向的钢焊后热处理时，应注意防止再热裂纹。

3）电渣焊焊缝焊后热处理采用正火 + 回火规范。

4）奥氏体高合金钢制压力容器一般不进行焊后消除应力的热处理。

5）焊后热处理应在补焊后，压力试验前进行。

6）当不得不采用分段热处理时，加热重叠部分的长度至少为 1 500 mm。补焊和筒体环缝局部热处理时，焊缝每侧加热带宽度不得小于容器厚度的 2 倍，接管与容器相焊的整圈焊缝热处理时，加热带宽度不得小于壳厚度的 6 倍。电站建设中，管道环焊缝热处理的加热宽度，从焊缝中心算起，每侧不小于管子壁厚的 3 倍，且不小于 60 mm。以上分段和局部热处理加热区外应采取防止有害温度梯度的措施，如管道热处理时，每侧不小于管子壁厚的 5 倍进行保温，以减小温度梯度。

7）炉外热处理的加热方法，应力求内外壁和焊缝两侧温度均匀，恒温时在加热范围内，任意两测点温差应低于 50℃。厚度大于 10 mm 时，可采用感应加热或电阻加热。

8）焊后热处理的测温必须准确可靠，应采用自动温度记录，所用仪表、热电偶及其附件应通过计量部门检定。应合理布置测温点，如管道热处理测温点应对称布置在焊缝两侧，且不得少于两点。水平管道的测温点则应上下对称布置。

9）热处理后，应做好记录和标记，如打上热处理工代号钢印等。

表 7.1-21　常用钢号推荐的预热温度

钢　号	厚度/mm	预热温度/℃
20G，20，20R，20g	30～50	≥50
	>50～100	≥100
	>100	≥150
16MnD，09MnNiD 16MnDR，09MnNiDR 15MnNiDR	≥30	≥50
16Mn，16MnR 15MnVR，15MnNbR	30～50	≥100
	>50	≥150
20MnMo 20MnMoD 08MnNiCrMoVD	任意厚度	≥100



续表 7.1-21

钢　　号	厚度/mm	预热温度/℃
07MnCrMoVR 07MnNiCrMoVDR	16 ~ 30	≥60
	> 30 ~ 40	≥80
	> 40 ~ 50	≥100
13MnNiMoNbR	任意厚度	≥150
18MnMoNbR		≥180
20MnMoNb	任意厚度	≥200
12CrMo，15CrMo 12CrMoG，15CrMoR 15CrMoG	> 10	≥150
12Cr1MoV 12Cr1MoVG 14Cr1MoR 14Cr1Mo， 12Cr2Mo，12Cr2Mo1 12Cr2MoG，12Cr2Mo1R	> 6	≥200
1Cr5Mo	任意厚度	≥250

表 7.1-22　常用钢号焊后热处理规范

钢　号	焊后热处理温度/℃		最短保温时间/h
	电弧焊	电渣焊	
10 Q235—A， 20 Q235—B， 20R Q235—C， 20 G 20 g	600 ~ 640		1）当焊后热处理厚度 $\delta_{PWHT} \leqslant 50$ mm 时为 $\frac{\delta_{PWHT}}{25}$，但最短时间不低于$\frac{1}{4}$ 2）当焊后热处理厚度 $\delta_{PWHT} > 50$ mm 时为 $2 + \frac{1}{4} \times \frac{\delta_{PWHT} - 125}{25}$
09MnD	580 ~ 620		
16MnR	600 ~ 640	900 ~ 930 正火后 600 ~ 640 回火	
16Mn， 16MnD， 16MnDR			
15MnVR， 15MnNbR	540 ~ 580		
20MnMo， 20MnMoD	580 ~ 620		
18MnMoNbR 13MnNiMoNbR	600 ~ 640	950 ~ 980 正火后 600 ~ 640 回火	
20MnMoNb			
07MnCrMoVR 07MnNiCrMo－ VDR 08MnNiCrMoVD	550 ~ 590		
09MnNiD， 09MnNiDR 15MnNiDR	540 ~ 580		

续表 7.1-22

钢　号	焊后热处理温度/℃		最短保温时间/h
	电弧焊	电渣焊	
12CrMo 12CrMoG	≥600		1）当焊后热处理厚度 $\delta_{PWHT} \leqslant 125$ mm 时为 $\frac{\delta_{PWHT}}{25}$，但最短时间不小于$\frac{1}{4}$ 2）当焊后热处理厚度 $\delta_{PWHT} > 125$ mm 时为 $5 + \frac{1}{4} \times \frac{\delta_{PWHT} - 125}{25}$
15CrMo 15CrMoG	≥600		
15CrMoR		890 ~ 950 正火后 ≥600 回火	
12CrlMoV 12CrlMoVG 14CrlMoR 14CrlMo	≥640		
12Cr2Mo 12Cr2Mo1 12Cr2Mo1R 12Cr2Mo1G	≥660		
1Cr5Mo	≥660		

6.5　焊接过程检验

焊接结构在制造过程中不可避免会产生各种各样不符合设计或要求的缺陷。产生这类缺陷的原因涉及焊接结构设计、材料接合性能以及焊接工艺等方面。焊接过程中的一整套经焊接工艺评定的技术规定称之为焊接工艺，其中包括焊前准备、焊接材料、焊接设备、焊接方法、焊接顺序、焊接操作的最佳选择以及焊后处理等。焊接工艺中的这些因素都会对焊接缺陷的产生具有不同程度的影响。要保证焊接质量，防止焊接缺陷的产生，就必须对焊接工艺因素进行有效的控制。同时，焊接缺陷的存在，对焊接接头的安全和使用性能有直接的影响，即焊接缺陷往往是造成焊接结构失效以至危害性事故的主要原因。因此，为了确保焊接结构的安全运行，必须对焊接缺陷进行有效的控制和定期检验。焊接检验是焊接结构制造过程中自始至终不可缺少的重要工序，是保证焊接产品质量的重要措施。

焊接检验的目的一方面是通过不同的方法检查出焊接接头中的缺陷，并且应按相应的标准或规定，对焊接接头质量作出评定；另一方面是对保证焊接接头质量的工艺条件进行检查，查出可能影响焊接接头质量的工艺条件的改变，并且予以监督改正。

影响焊接质量的因素比较复杂，有些可以通过无损检验的方法对焊接接头进行直接检验，确定焊接缺陷；有些则只有通过破坏性检验的方法才能确定焊接缺陷。对于不能使用直接检验方法进行检验的焊接缺陷，往往只能对焊接工艺保证条件的检验来代替直接检验，这种检验也是和无损检验同等重要的。

焊接检验的方法应该包括无损检验、破坏性检验和焊接工艺保证条件的检验，如图 7.1-40，分述如下。

6.5.1　无损检验

（1）射线探伤

射线探伤方法的种类主要有 X 射线、γ 射线和高能射线。它们是一些波长极短的电磁波和高能粒子流。锅炉压力容器射线探伤以射线使用最广泛。

X 射线探伤的原理是：利用 X 射线管所产生的波长很短的电磁波，穿透被透照的焊缝，当相同厚度的焊接接头材质密度也相同时，射线透过的强度相同。如果焊接接头内部有



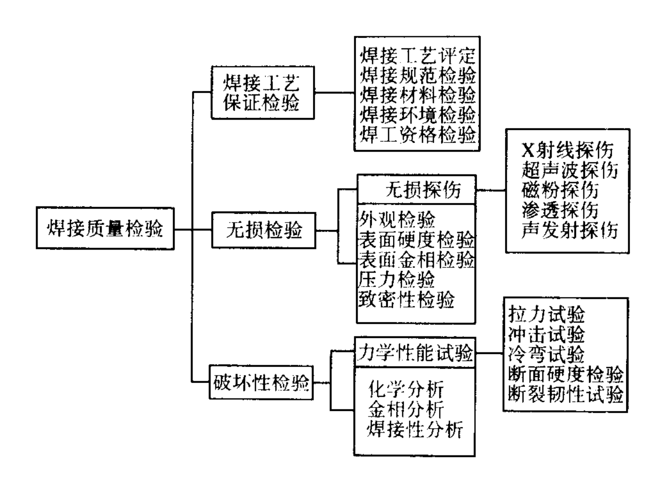


图 7.1-40 焊接质量检验分类

缺陷，造成密度不等，密度大的部位，射线衰减大，透过工件的射线强度弱，这样就造成了透过工件的射线强度的强弱不同，使放置在工件背面的胶片感光程度不同，底片经暗室处理后，就在底片上产生了黑度差。根据底片上的黑度差及其形态，就可判断有无缺陷和缺陷的形态、种类及尺寸。

X射线探伤适用于检查焊缝内部缺陷，而且检查结果可用底片作为依据。所以应用极为普遍。射线探伤特点是对于气孔、夹渣、凹坑等体积性缺陷，在射线透照方向中有明显厚度差，即使很小的缺陷也较容易检查出来。而对于裂纹、未熔合、未焊透那样的面状缺陷，只有在与X射线束平行方向有一定厚度的缺陷才容易检查出来。如果与射线束垂直或倾斜角较大，就很难查出。

焊缝射线探伤是根据GB3323—1987《钢熔化焊对接接头射线照相和质量分级》标准进行拍片操作和进行焊缝质量评级的。为了有利于焊缝质量跟踪和提高返修合格率，焊工应会识片，分析缺陷性质、缺陷位置及缺陷产生原因。

(2) 超声波探伤

超声波是振动频率超过人耳听觉范围的声波，频率在20 000 Hz以上。

超声波探伤是利用具有压电效应的压电换能器，将高频脉冲振荡电流转换为超声波，通过耦电介质（甘油、合成浆糊等）传入工件中。由于超声波有很强的穿透能力，在工件中按一定的方向传播。当超声波传播中遇到工件内部缺陷和工件的界面时，又会反射回来，又由换能器接收并转换为高频脉冲振荡电信号，经接收放大后在指示器的荧光屏上显示出回波的反射脉冲、测量超声波从缺陷处和界面反射波的时间差，就能从屏幕的波形显示区判别工件内部有无缺陷和分析缺陷的部位及形状。这种方法称为反射法。同样原理也可测量超声波从缺陷处和界面反射波之间的频率差（调谐法）或透过工件的能量差（穿透法）判别工件内部有无缺陷和分析缺陷的部位及形状。但测量时间差的反射法应用最为普遍。

超声波探伤也是焊接结构焊缝检验的一种主要探伤方法：超声波探伤特点表现在它对于面状缺陷如未焊透、未熔合、裂纹等的探伤灵敏度很高，而对于体状特别是球面体状缺陷如气孔的探伤灵敏度不如射线探伤，若缺陷不是相当大或不是密集的，就不易得到足够的缺陷反射波而被漏检。超声波探伤的另一个特点就是其可靠性在很大程度上取决于探伤人员的技术水平和工作责任感以及探伤仪的灵敏度，加之探伤过程不能作自动记录，只能由探伤人员自行记录，因此探伤结果的凭证不如射线探伤底片可靠。

各种缺陷的波形特征如图 7.1-41 所示，描述如下。

① 气孔　气孔一般是球形，反射面较小，对超声波反射不大，且单纯。因此在荧光屏上单独出现一个尖波，波形也比较单纯。当探头绕缺陷转动时，缺陷波高度不变，但探头原地转动时，单个气孔的反射波即迅速消失。而链状气孔则不断出现缺陷波。密集气孔则出现数个此起彼落的缺陷波。

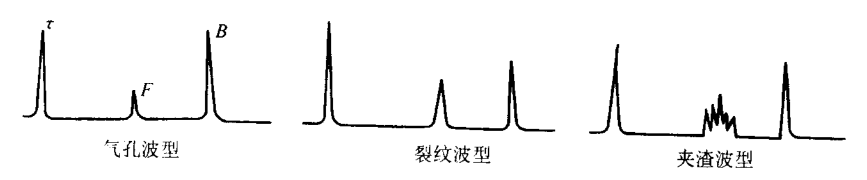


图 7.1-41 各种缺陷的超声波信号反射波

② 裂纹　裂纹的反射面积较气孔为大，而且较为曲折，用斜探头探伤时荧光屏上往往出现锯齿较多的尖波。若探头此时沿缺陷长度方向平行移动，波形中锯齿变化很大，波高也有些变化。当探头平移一段距离后波高才逐渐降低至消失。但当探头绕缺陷转动，缺陷波迅速消失。

③ 夹渣　夹渣本身形状不规则，表面粗糙，故其波形是由一串高低不同的小波合并的，波根部较宽。当探头沿缺陷平行移动时，条状夹渣的波会连续出现。转动探头时，波迅速降低。而块状夹渣在较大的范围内都有缺陷波。且在不同方向探测时，能获得不同形状的缺陷波。

(3) 磁粉探伤

磁粉探伤又称磁力探伤，其原理是铁磁材料通过外加磁场磁化后，若在工件表面或浅层存在缺陷，则将产生漏磁现象。当磁粉撒布或涂刷在工件表面时，磁粉将被缺陷处漏磁场吸附产生磁粉堆积）磁粉堆积处就是缺陷所在部位。

磁粉探伤的灵敏度取决于漏磁场的强弱，它是由缺陷的位置、尺寸和材料的磁化强度等因素所决定。磁粉探伤只适用于铁磁性材料的工件，而且缺陷必须与磁力线方向垂直，因此，使用旋转磁场的探伤仪比鞍形磁轭探伤仪要好，既方便了操作，又提高了对表面缺陷的检出率。

(4) 渗透探伤

渗透探伤是利用毛细现象来检查焊缝表面的缺陷，它的原理是将渗透性强的液体渗进材料表面缺陷后，再用显示剂显示出缺陷的部位和形状。

渗透探伤可用来检测铁磁性材料或非铁磁性材料（包括焊缝）的表面裂纹、折叠、分层、疏松等。一般可发现深度0.03～0.04 mm、宽0.01 mm以上的缺陷，液体渗透探伤法按渗透液的显示分为荧光法和着色法两种。荧光法是用荧光液代替着色液，并需在紫外线照射下才能显示缺陷的荧光图像。

(5) 其他无损检验

压力试验和致密性试验。这是一种综合性检验，除了验证锅炉压力容器是否具备在最高工作压力下安全运行所需的承压能力和各连接部位的严密性外，也可以发现焊接接头是否有穿透性缺陷或极其细微孔隙而导致泄漏。

表面硬度试验和表面金相检验。这两种表面检验是辅助



检验手段，通过对表面的硬度和金相检验，可以观察焊接接头、特别是过热区的硬度和组织，从而分析热影响区的淬硬程度和焊接线能量是否合适。这两种检验方法是在用焊接结构的定期检验的辅助方法。对于具有腐蚀或应力腐蚀条件的焊接结构，表面金相检验还可以检查和分析腐蚀情况、应力腐蚀和高温蠕变倾向，同时也是焊接结构事故分析的必要手段。

6.5.2 破坏性检验

（1）力学性能试验

力学性能试验包括抗拉试验、冲击试验、冷弯试验、硬度试验和断裂韧度试验。这些试验只能将焊接试板加工成试样来进行。一般是用在焊接工艺评定和产品焊接试板的检验上，以试验结果来测定或验证产品焊接接头是否是有所要求的使用性能；一般情况下，断裂韧度试验是为了检验焊接接头抵抗缺陷开裂或裂纹扩展的能力，只是用于对带有缺陷的压力容器进行安全评定时所必需的数据；拉伸试验是为了检验焊接接头的强度和塑性；冷弯试验是为了检验焊接接头的塑性，同时也可反映出焊接接头各个区域的塑性差别以及暴露焊接缺陷和考核熔合线（半熔化区）的接合质量；冲击试验是为了检验焊接接头的韧性和缺口敏感性，这是重要焊接结构焊接接头的一项重要性能指标，目前规定采用夏比V形缺口试样进行冲击试验。硬度试验可以测定材料对弹性和塑性变形的抗力及材料破坏时的抗力。硬度试验的测量单位很小，可以对焊接接头内每一区进行测定，从而可以协助精确的判明整个结构或产品的性能。

（2）金相检验

金相检验是为了观察和分析由于焊接热过程和冶金反应所造成的金相组织变化和组织缺陷。金相检验又分宏观检验和微观检验。宏观金相检验是直接用肉眼或低倍放大镜来观察焊接接头的断面组织，包括焊接接头焊缝、半熔化区和热影响区的界限和尺寸以及焊接缺陷，从宏观金相中可以明显看到焊缝金属与母材的分界线和焊缝根部凹坑的缺陷。断口分析也是宏观金相的一种，从拉力试件断口上可见明显的白点；微观金相检验是用显微镜观察焊接接头的显微组织和显微缺陷。

7 典型焊接结构制造工艺

所谓典型焊接结构，是指常见的最适宜于用焊接方法制造的金属结构。由于焊接结构的种类繁多，其分类方法也不尽相同。例如，按半成品的制造方法可分为板焊结构、锻焊或铸焊结构等；按照结构的用途则可分为车辆结构、船体结构、飞机结构等等；根据焊件的材料厚度则可分为薄壁结构和厚壁结构；根据焊件的材料种类则可分为钢制结构、铝制结构、钛制结构等等。现在国内外通用的分类方法是根据焊接物体或结构的工作特性来分类，并将焊接结构分成下列几类。

1）梁及梁系结构　这类结构的工作特点是构件受横向弯曲，当由多根梁通过刚性连接，组成梁系结构（或称框架结构）时，各梁的受力情况将变得较为复杂。

2）柱类结构　这类结构的特点是承受压力或在受压同时又承受纵向弯曲。上述两类结构的断面形状多为“工”字形、“箱形”或管式圆形断面。柱类结构也常用各种型钢组合成所谓虚腹虚壁式组合截面。采用这些形式都可增大惯性矩、节约材料。

3）格架结构　它是由一系列受拉或受压焊件组合而成，各焊件以节点形式互相连接组成各种形状结构如桁架、网络钢架、骨架和火箭发射塔架等。

4）壳体结构　这类结构承受较大的内部压力，因而要求焊接接头具有良好的气密性，如容器、储器和管道等，多用钢板焊制而成。

5）骨架结构　这类结构外形如同人体骨架，多用于起重运输机械和建筑顶棚结构，通常承受动载荷，故而要求它具有最小的重量和较大的刚度，船体骨架、客车棚架及汽车车厢和驾驶室等也属此类结构。骨架和格架结构的原材料多为各种型钢，有时将两类结构统称为格架或桁架结构。

6）机器和仪器结构　这类结构最适宜于在交变载荷或多次重复性载荷下工作。因此对这类结构要求具有精确的尺寸才能保证加工出的主要部件或仪表零件的质量。属于该类结构的有机座、机身、机床横梁及齿轮、飞轮和仪表支座等。这类结构采用钢板焊接或铸焊、锻焊联合工艺，可以解决铸锻设备能力不足的问题，同时大大缩短了制造周期。

7.1 梁系结构的装焊工艺问题

用钢板制成的梁柱结构有很多共性，生产它们的主要问题是焊接变形的控制和调节，这在桥式起重机主梁焊接工艺分析中已有介绍，不另赘述。本节主要介绍油罐车底架的装焊问题。

随着石油工业的蓬勃兴起，石油运输除铺设管道直接输送外，利用油罐车铁路运输仍是重要手段之一。罐车底架上部安放油罐，下部有车轮构成一节车体，可以随时挂车或组成专列。

罐车底架由中梁、侧梁、端梁和枕梁组成梁系框架，整体外形好似一只哑铃，如图7.1-42所示。其主要技术条件如下。

1）全长公差±10 mm，宽度公差±5 mm。

2）全长对角线允差<10 mm。

3）两枕梁间距允差±8 mm；枕梁间两对角线允差为8 mm。

4）整个底架挠度±5 mm，中梁挠度最好保证为0～5 mm。

5）心盘支承面对同一水平面的倾斜应不大于0.5 mm（这一要求较高）。

6）底架任一横截面上各梁的水平允差在枕梁处5 mm、在端梁处10 mm。

7）枕、侧、端各梁对底架中心线对称允许公差2 mm。

7.1.1 技术条件分析

1）底架长、宽及对角线公差的保证，关键在于各梁本身的制造质量及各梁组装底架时的装配、焊接质量要求各梁零件的备料尺寸要予以保证。

2）整个底架的焊缝分布在横截面水平轴的上方，易产生较大的下挠。装配时以中梁为装配基准，故中梁挠度是保证整个底架挠度的关键。

3）心盘支承面与同一水平支承面的倾斜公差要求是很高的。如果中梁本身扭曲（极易产生）就很容易使心盘倾斜超差。

可以看出：中梁的挠度及扭曲和心盘的倾斜是底架制造的关键问题。

7.1.2 关于挠度问题

影响底架和中梁挠度的因素大致如下：

1）中梁槽钢在吊运过程中平直度受到破坏。

2）如为了获得上挠而采用夹紧措施时，松去夹紧力后，挠度数值变化超差。

3）焊接变形的影响。

中梁隔板与槽钢腹板的角焊缝在中梁截面中心的下方，焊后有引起上挠的趋向；心盘座、中梁连接板、补强板处焊缝焊后都有使中梁上挠的趋向。



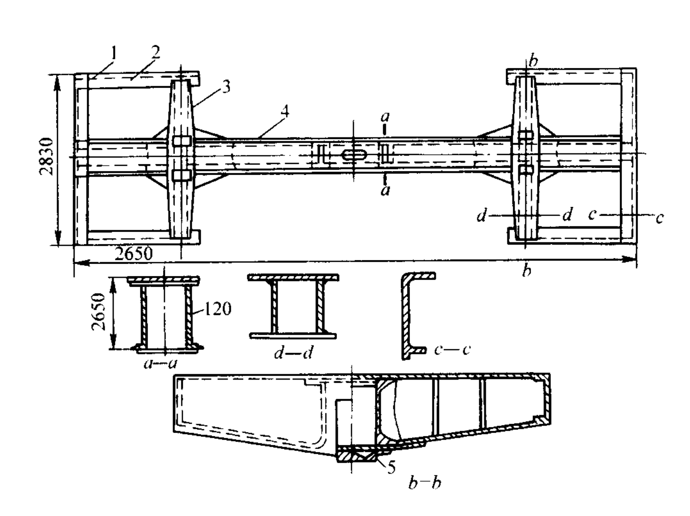


图 7.1-42　油罐车底架

1—端梁（τ），2 根；2—侧梁（τ），4 根；3—枕梁，1 根；4—中梁，2 个；5—心盘

中梁盖板焊缝以及下鞍处的焊缝，焊后会造成较大的下挠；这些焊缝是影响中梁下挠的最主要焊缝。同时，这些焊缝由于焊接顺序不同，也会引起旁弯。

底架组装时，正面侧面及反面焊缝焊后同样会影响底架的变形。

为了获得中梁上挠，应采取如下措施：

1）采用合理的焊接次序以建立有利于中梁上挠的趋势，应先焊接心盘座焊缝、中梁连接板焊缝，由于此时盖板焊缝尚未焊上，中梁的刚度较弱，建立上挠容易。

2）上述焊缝焊完后，再焊盖板及下鞍处焊缝，此时中梁已上挠，上述焊缝的下挠变形有所减少。

3）由于中梁盖板焊缝及下鞍处焊缝造成中梁下挠很大，其余焊缝引起的上挠不足以克服中梁的下挠，所以为获得上挠尚需采用反变形措施，反变形可有两种方案，如下。

① 中梁槽钢预制反变形　将中梁槽钢在顶床上顶出上挠度，然后进行组装。中梁在焊接过程中虽有下挠，但因预制上挠，最终仍能获得所需的上挠度。关于预制反变形，过去中梁制造工艺曾有采用，但顶出的挠度、各个槽钢都不均匀，两根槽钢组对后反而影响心盘面的倾斜，而且顶出后的挠度在吊运、孔加工、堆放时又会发生变化，使组对的二槽钢上挠度不等而影响心盘面的倾斜。因此采用中梁予制反变形并不理想。

② 强制反变形　在中梁盖板焊缝以及下鞍焊缝焊接时将中梁夹固在强制变形的胎具上，使其在上挠状态进行焊接这样可以减少这些焊缝造成的下挠。同时为保证底架获得所需的上挠，在正面焊缝、侧面焊缝及反面焊缝焊接时，同样将底架夹固和强制变形状态下进行效果良好。

4）焊接中梁盖板焊缝时，采用细丝 CO_2 焊法以减少变形，也是相当有效的。

7.1.3　心盘面倾斜问题

技术条件规定心盘对同一水平面的倾斜度不得超过 0.5 mm。两心盘平面与水平胎具的间隙总和不大于 1 mm。这是因为考虑到罐车运行时的平稳和安全。而且，心盘面过大地倾斜也将造成心盘过早的磨损。

造成心盘倾斜的原因如下。

1）由于心盘作为中梁的一个部件在中梁组成底架前已经铆装在中梁上，因此造成中梁扭曲变形的因素均会引起心盘面的倾斜。

① 由于槽钢本身的扭曲、上、下翼板互不平行，槽钢腹板和翼板不垂直影响的结果；

② 中梁焊接顺序的影响，如以焊接盖板焊缝和下鞍处焊缝为例：由于焊接有先后，先焊一侧的槽钢与后焊一侧的槽钢其挠度不等，会影响心盘倾斜。

③ 中梁零件的尺寸公差要保证。中梁隔板的下料尺寸必须予以保证，尺寸不同，焊后将引起中梁的扭曲。

2）铆装心盘时的质量。枕梁下盖板（中）、心盘座和心盘铆装时间隙及装配质量也很重要，这涉及到枕梁下盖板的压型精度、槽钢翼板平面的平行度、心盘机加工时的尺寸精度（“毛面”与“光面”的平行度）、孔加工的质量等，它们的误差积累会使心盘超差。

3）中梁与底架组装时的焊接变形以及枕梁下盖板（中）压型精度等引起的心盘歪斜。

4）底架的扭曲变形而引起的心盘倾斜。

目前底架工艺采用正装法，即以心盘面作为基准面，心盘在底架总装前已铆装在中梁上。各梁以中梁为准组焊，由于焊缝偏于底架上部，装配焊接胎对焊接变形的控制能力有限，因此，会引起底架的扭曲而影响心盘的倾斜。

解决心盘倾斜问题的工艺措施可作如下考虑：

① 选择合理的装配与测量基准和心盘安装工序；

② 严格保证中梁的制造质量（包括铆装心盘），从备料到焊接的所有各个工序要严加检查；

③ 保证心盘本身的尺寸精度；

④ 控制底架组装时的装配质量和各种焊接变形，底架焊接时尽量采用对称焊接。

7.1.4　中梁扭曲问题

中梁由两槽钢组成，上下两面焊缝不对称，单根槽钢备料时尺寸超差，肋板焊接有先后而产生变形等原因，会使中梁产生扭曲，底架组装时，中梁与枕梁连接处构造复杂，焊缝集中，中梁两侧变形不一致时，也会使中梁产生扭曲并进而影响到其他技术条件的保证，如两对角线长度超差等。

解决中梁扭曲的措施如下：

1）注意中梁槽钢本身的形状及尺寸误差，尤其要严格控制两根槽钢在预制上挠时要采用同一数值，否则将有扭曲或倾斜。

2）尽量对称施焊，控制焊接变形，利用胎具强制变形达到技术要求。

3）合理选择装配基准、焊接支承基准及测量基准，目前底架生产采用正装法，底架焊接时在正面及反面焊接胎具上进行强力夹固以强制变形，结果使得扭曲变形大为减少，超差问题并不严重。

通过以上简要分析，不难看出整个底架的关键工艺和控制点是中梁制造精度和心盘铆装精度的保证。

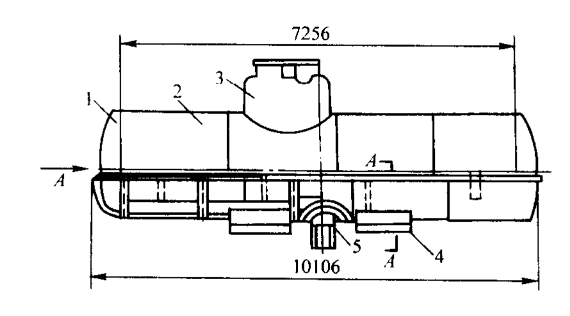


7.2 壳体结构的装焊工艺问题

属于壳体类的结构很多，但这里主要讨论的是各种容器焊接的有关问题。

7.2.1 黏油罐体

408型黏油罐体结构如图7.1-43所示，是下厚上薄的两种低碳钢板对焊而成；外部下半圆范围内有加温套，以便加热粘油使之流出，下部之托板与火车车底架相连。其工作压力为0.1 MPa。



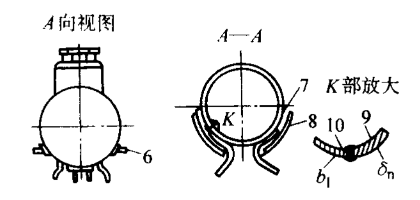


图7.1-43　油罐车罐体
1—封头；2—筒体；3—空气包；4—托板；5—排油阀；6—进气管座；7—支铁；8—加温；9—底板；10—盖板

主要技术要求如下：

1）全长允许挠度范围（+7～-10）mm，但排油阀必须处于最低点。

2）允许旁弯15 mm，局部凹凸在300 mm内2 mm。

3）罐体任一截面的椭圆度为25 mm。

4）罐体外圆周长与设计圆周长之差0.5%。

5）空气包与罐体中心线之差15 mm；在任一方向的偏移量8 mm。

6）排油阀与聚油窝对于罐体中心偏移在任何方向5 mm；空气包本身之椭圆度与设计直径之差1%。

7）罐体下部之四块托板在纵向的不平行度Δ=（+3～-10）。

8）加温套焊后纵向凹凸在300 mm内4 mm，焊缝附近6 mm。

（1）油罐体制造中的挠度

技术条件要求挠度为（+7～-10）mm，但排油阀则要求处于最低位置，因而挠度最好取负值，这在分节制造中获得并不困难，但焊接排油阀及加温套内部支铁时，将使罐体产生上挠，故预制下挠时要考虑这一下挠损失的补偿问题。

预制下挠可有下述三种方案：

1）罐体分节装配，获得折线下挠如图7.1-44a所示；

2）将罐体底板拼接时做成挠度如图7.1-44b所示，但这时要进行罐体上盖板与底板装配将会有一定的困难；

3）在成形下底板时利用在滚床上加垫铁的方法，造成局部外凸，如图7.1-44c所示。或者将装配排油阀处热冲成带有翻边的孔，然后与排油阀对接，如图7.1-44d。

罐体的挠度要求除了保证其几何形状外，还须使罐体内液体易于排出。根据经验，挠度可为16～18 mm，取负值。

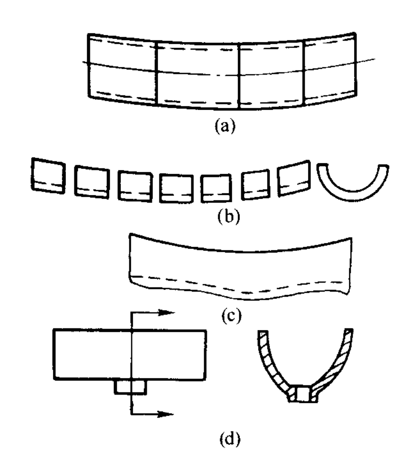


图7.1-44　预制下挠方法

（2）油罐体制造中的波浪变形

由于罐体的纵缝、环缝的焊接收缩和压应力引起罐体的波浪变形，即局部凸凹不平。波浪变形不仅影响外观，而且使装焊加温套的支铁和加温套套板困难。

火焰加热和锤击是解决波浪变形的常用方法，但它严重影响生产率；如果在成形设备许可的条件下，整体成形（即先拼焊板料，成形后焊接一条对接纵缝），不仅可以减少变形，而且改善了装配焊接工作（消除了环缝的焊接，省去了环缝焊接装置和节省了各段纵缝焊接的辅助时间，平板对接也易于保证焊接质量）。

除上述问题外，由于刚度小，在生产中还有椭圆和环缝焊接支点处局部变形问题。通常用活动的螺旋内撑器加强其刚度；也有在设计中即考虑安装固定肋杆的，如图7.1-45所示。本产品底板两侧也有这种性质的固定肋板。

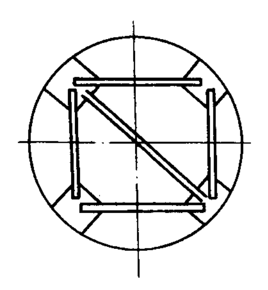


图7.1-45　固定肋杆示意图

（3）罐体制造方案

在解决挠度及波浪变形问题中，都提到了罐体是总体装焊还是分节制造后再进行拼接的问题。在设计能力及技术水平许可的条件下，采用钢板平面拼接此即所谓“大拼板”装焊方案，板上的纵横缝均成十字交叉，以利自动化焊接，拼装与正反面焊缝均在同一翻转胎具上进行，之后成形，最后焊成圆筒的总装方案是理想的。

环缝焊接时工件的轴向移动。工件在焊接时轴向移动的结果使焊丝末端偏离焊缝，导致双面对接接头可能焊不透。产生轴向移动的因素如下：

1）工件不圆，尤其是呈圆锥形；

2）筒身挠度不均匀或挠度峰值偏离其长度中心较远；

3）支承筒身之两排滚轮高度不一致（纵向倾斜）如图7.1-46a。

4）滚轮不在同一侧之纵向直线上（如图7.1-46b）和滚轮对于其装配位置的倾斜（如图7.1-46c）。



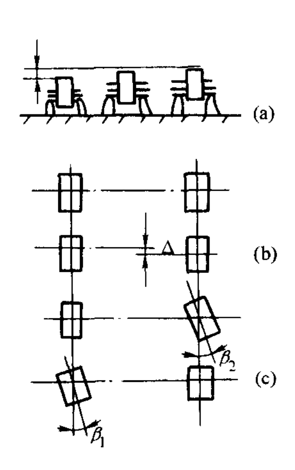


图 7.1-46 滚轮位置与轴向位移

实际生产中，对于直径为 1 m 的锅炉，轴向移动最大者可达 8～11 mm/r，这是上述各因素综合作用的结果。由于每一个筒身都有其不尽相同的外形缺陷，即使滚轮支架安装正确也会有移动产生。焊前空转时测量，移动在 0.5～2.0 mm/r内时，可在焊接时调节焊机机头；超出该数字时，可采用推挡、拉紧等方法防止，但比较困难，需要很大外力。经验表明，如能将滚轮支座做成活动可调的，根据移动量调节滚轮，使其如图 7.1-46c 所示，即调节 β 角，是解决轴向移动的最理想措施。

对于薄板组成的容器，如果批量大且条件具备采用大拼板工艺，即将钢板拼装对焊成大型钢板，经一次成形后最多焊接一条纵缝和封头的两条环缝，制造工艺大为简化。

容器类结构的焊接接头要具有较好的气密性。因此它的纵环缝都要双面焊并且焊透。容器壁厚 < 30 mm 时，其纵环缝多用埋弧自动焊；壁厚 > 40 mm 时，其纵缝多用电渣焊，环缝用埋弧焊或气保护焊。凡经电渣焊焊成的构件，焊后均须经正火处理以改善粗晶组织和接头力学性能。

7.2.2 球形容器

随着我国石化工业的发展，球形容器在石油、化工、冶金及燃料等行业中的应用日益广泛。典型球形容器的结构如图 7.1-47 所示，通常分为南极带、南温带、赤道带、北温带和北极带等部分，也有以赤道环缝为界将球体分为南北两个半球的。每一圈带板均由若干块“橘瓣”形或足球壳块形钢板组焊而成（见图 7.1-47a 及 b）。当球体焊接完成后，由若干支承将其架设在空间即可供使用。

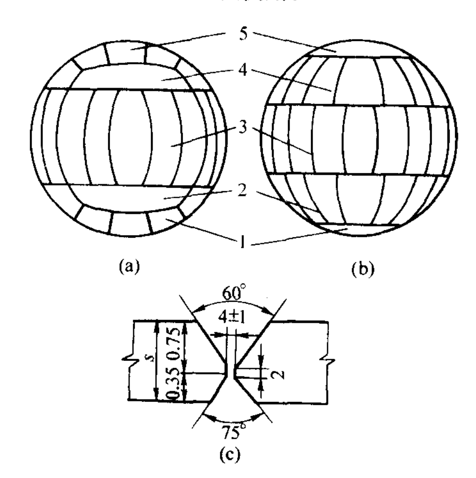


图 7.1-47 典型球罐结构简图

1—南极带；2—南温带；3—赤道带；4—北温带；5—北极带

球形容器的容积日益扩大，由于受运输及制造条件的限制，橘瓣又不可能太大以减少其数量，结果使焊接量越来越大，这就带来了相应的困难和问题。焊接裂纹及由此产生的事故，厚板焊接的残余应力等问题，都须慎重处理。

球罐纵环缝对接接头如图 7.1-47c 所示。壁厚根据工作压力确定，一般为 16～40 mm。由于钢板要焊透并要尽量降低角变形，因此采用不对称对接坡口形式。在施工和安装中，立、横焊缝较多，各占焊缝总长的 30% 以上，仰焊及平焊焊缝各占 10% 左右。在生产方式上以手工装配与施焊时，产品质量的保证是关键问题。根据调查分析，球罐焊接生产中的主要问题有以下几种。

（1）焊接裂纹问题

1980～1983 年以来的开罐检查发现焊缝表面裂纹发生率为 78%，裂纹深度超过壁厚一半的竟达 16%。裂纹源多在近缝区高硬度组织部位，氢致延迟裂纹尤其如此，裂纹长度一般在 10 mm 以下，深度为 3 mm 左右，这种小裂纹一般与焊缝垂直，多发生在夹具点固处，点固短焊缝处和补焊部位。

对超标的裂纹须进行修补处理，裂纹的允许尺寸 a 的评定标准有下述三种。

1）以 COD 为主要判据的英国 BSIPD6493（IIW 已采用）评定标准

$$\delta_c = 2\pi \bar{a}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}\right)^2 \qquad (\varepsilon \leqslant 0.5\varepsilon_y)$$

式中，δ_c 为容器材料的抗脆断指标；a 为允许穿透性裂纹的半长；ε_y 为材料的弹性应变极限；ε 为外力作用下的总应变。

试验和使用表明以该式所求出之裂纹长度作为标准是比较保守的。

2）日本所用的 WES2805 标准，当材料的 $\sigma_y \leqslant 480$ MPa 时

$$\delta_c = 3.5\varepsilon a$$

当材料的 $\sigma_y > 480$ MPa 时

$$\delta_c = 2\pi\varepsilon_y \bar{a}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}\right)^2 \qquad (\varepsilon > 0)$$

3）我国对球罐建造质量及缺陷标准，根据国情也作了相应的规定如“压力容器缺陷规范”JB1127—80 或 JB741—73、JB1148—73 以及 JB/T 4291—1999、GB/T 2358—1994 和 GB12337—1998 等标准。

对未超标裂纹，除保留少数几条作为观测和研究（仅适用于质量较好，裂纹数量不多且不密集的产品）外，其余裂纹应一律磨光或修补。

（2）装配错边和焊接角变形

这两种工艺缺陷是由于零件加工备料尺寸超差和组装焊接工艺不当所引起。它们都将产生附加弯曲应力，提高该处应力水平，降低缺陷尺寸允许量。

错边引起的附加应力可用下式计算。

1）日本压力容器缺陷评定标准 WES2805 采用的计算式为（图 7.1-48）

$$\sigma_h = \frac{3h}{t}\sigma_m$$

式中，σ_h 为错边引起的附加应力；h 为错边量；t 为壁厚；σ_m 为膜应力。

2）D.P.Games 等根据管道承受内压时其纵向焊缝因错边而引起的应力集中系数为

$$K_t = 1 + \frac{3h}{t\ (1-\upsilon^2)}$$

式中，υ 为泊松比，本式考虑了平面应力状态。由此得平面

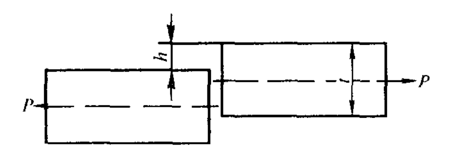


图 7.1-48　错边引起附加弯曲应力

应力状态下附加弯曲应力为

$$\sigma_h = \frac{3h}{t\ (1-\upsilon^2)}\sigma_m$$

此公式与日本公式所计算的结果与实测结果基本一致。

关于角变形引起的附加弯曲应力 WES2805 标准及日本国家金属研究所 1978 年发表的计算式分别表达如下

$$\sigma_W = \frac{3W}{t}\sigma_m$$

$$\sigma_W = \frac{1.5LW}{t}\sigma_m$$

式中，W 为角变形量，mm/m；σ_W 为由角变形引起的附加弯曲应力；L 为因角变形而致不圆度的距离，m。

错边和角变形一旦在球罐上出现，矫正和修复是相当困难的。如果该处尚存在其他缺陷并足以产生裂纹时，则应尽量修复或矫正。

（3）焊接工艺缺陷

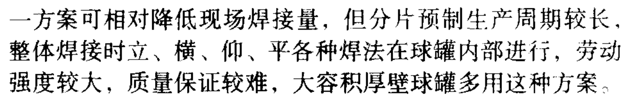
在手工多层焊时，焊接工艺缺陷主要是存在焊缝内部的夹渣、气孔、未焊透和未熔合等。在球罐内部因组装需要而设置拉撑和支承等的点固焊缝以及拆除时的割痕等，都导致严重的残余应力和应力集中。虽然调查研究表明焊缝内部的原生缺陷在使用过程中均未发现有扩展现象，但这仅说明球罐的应力较低、材料韧性较好；而在拉应力区及应力集中处将引起应力腐蚀开裂问题，不能不予以关切。所有这些问题，都与工艺制度不严、焊工缺乏培训、检验制度不健全、岗位责任不明确等有关。

球罐大部分是在工地现场安装施工，生产率较低，且质量不易保证，球罐容积越大，壁厚越厚，这些问题越突出。

（4）球罐生产工艺方案问题

球罐生产工艺方案通常有下列三种。

1）分片予制、现场整体装焊方案　将每一带板中的相邻三块（块数多少决定于尺寸及便于运输）在工厂装焊成组件，运到施工现场后再将各组件装配成球体，之后焊接。这


一方案可相对降低现场焊接量，但分片预制生产周期较长，整体焊接时立、横、仰、平各种焊法在球罐内部进行，劳动强度较大，质量保证较难，大容积厚壁球罐多用这种方案。

2）吊轴旋转整体装焊方案　先将球罐组成球体，后在赤道带上对称中心装焊两根吊轴。此时先焊上半球的外表面和下半球的内表面焊缝，成为较易操作的上坡立焊位置；然后利用吊轴将球体吊起并旋转 180°，再焊上半球的内表面和下半球的外表面焊缝，仍为上坡立焊。这一方案可以将内外纵缝改成上坡立焊。但为了吊起整个球体需要有大型的起吊设备。因此，这一方案用于中小型球罐是合适的。

3）分带预制、整体叠装焊接方案　将南极带－南温带、北极带－北温带和赤道分别装焊成三大组件。预制这些大组件时可将其各翻转一次，使之成为上坡立焊位置。然后以南极带为装配基准逐层往上叠装并焊接两条环缝。后两个工艺方案均可避开质量最难保证的仰焊位置，减少了容器内部的焊接量，缩短了生产周期，但该方案最适合薄壁球罐。在预制各带板环时，一旦变形不匀并导致各带板环间对缝不合拢，则将产生严重的错边而且不易修正，对厚壁球罐更应注意。

在上述三个方案中，如果具备生产设备、生产经验并且在运输条件许可的情况下，采用后一种方案是最合适的。

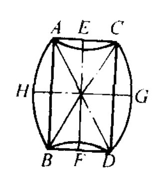
（5）球罐的备料、装配与焊接

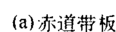
为了避免球罐错边与强力装配，关键问题在于备料和准确装配。首先应有精确的划线样板。利用放样实测或者计算均可，但后者精度更高。在自动切割时，规范参数（对 30 mm厚钢板）建议在专用切割平台上进行时，切速为300～350 mm/min，切割机在台下或钢板上行走时为250 mm/min，氧气压力保持 0.5 MPa。乙炔压力为 0.04～0.08 MPa 为宜。

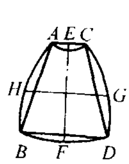
对于 400 m^3 的球罐，其瓜皮片的几何尺寸及允差见表 7.1-23 及图 7.1-49。

表 7.1-23　400 m^3 球罐几何尺寸表

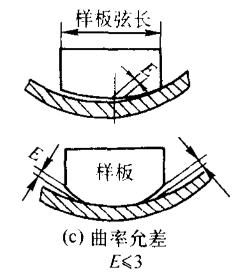
板边名称		AC	HG	BD	AB	EF	CD	CB	AD
赤道板	弦长	1 658	1 795	1 658	3 521	3 521	3 521	3 392	3 892
	弧长	1 669		1 669	3 613	3 613	3 613		
温带板	弦长	687	1 267	1 658	3 521	3 521	3 521	3 679	3 679
	弧长	691		1 669	3 613	3 613	3 613		



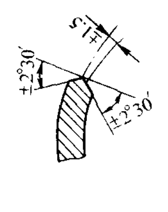

(a)赤道带板



(b)温带



(c)曲率允差 E≤3



(d)坡口值允差

图 7.1-49　瓜皮片的几何尺寸及允差

如果备料尺寸准确，装配间隙正确，在装配过程中即可避免强力装配所带来的过大装配应力，并可在装配或安装状态下实行自由状态焊接，避免因拘束过大而导致焊接裂纹和使焊缝得以自由收缩而降低残余应力。

为了保证装配或安装质量，应采取全面质量管理措施，严格岗位责任制，对预制件进行检查并作出记录，列出缺陷调查表，画出缺陷排列图（即将各种缺陷出现的个数、频率等做成图表），进行因果分析并确定对策和具体措施。各种措施均须有效果检查及记录。并作为提高质量的反馈信息。这种“二二图标制度”及质量调查表或统计表，缺陷排列图、因果分析图及对策表的循环实施。可使产品质量逐步提高，生产单位也可因此而制定出施工规范和技术标准化作业指导书，这些措施对焊接工作同样是必须的和有效的。

球罐的焊接除在工厂进行预制阶段条件较好，可以实现机械化外，在工地施工情况下，多数是手工焊。用不对称 X 形坡口（图 7.1-47c），采用 5015 焊条及直流反接电源，坡口



两边 30 ~ 50 mm 范围内除锈打光。在保证焊透的情况下尽量减小对接间隙以减小焊接变形；各条焊缝的间隙应尽量保持均匀一致，以使整体变形均匀。焊条应烘干和保温使用，所有焊工应经过培训和考试合格后方可参与施焊。

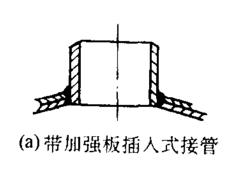
焊接时，点固焊缝应位于小坡口的一面，施焊则须先焊坡口大的一面；焊后清根，打磨毛刺后再焊接小坡口焊缝。每条焊缝应一次焊完，层间接头应错开 80 ~ 120 mm，焊完后应即进行无损探伤检查。在各种焊接位置下每层堆焊厚度为 3.5 ~ 4 mm，应严格控制焊接线能量以求质量稳定，引弧及熄弧应尽量设置引出板。

在安装施工情况下，焊接顺序应是先焊各块瓜皮间的纵缝，后焊各带板之间的环缝。例如在焊接赤道带与南温带间的环缝前，须先装配南温带板与南极带板，以便利用构件本身的点装刚性来限制焊接环缝时可能发生的焊接变形并避免了由此而可能导致的强力装配。这种焊接顺序的安排原则与制造圆柱形容器的工艺要点是一致的。

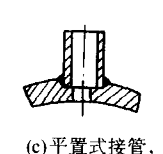
球罐在安装过程中，在其内部焊有临时支撑等，当支撑拆除后，临时性焊缝一定要清除干净，不允许残留焊疤和弧坑。

7.2.3　容器上的支管连接

在锅炉汽包、压力容器、球罐等容器上，需要焊接各种类型的管道、支管等。支管连接处钻孔后，孔附近将有相当大的应力集中。为了减少孔口处应力集中影响，对于薄板可在孔口周围进行补强加固，如图 7.1-50a 所示。当壁厚较大或支管直径较小时，可直接插入焊牢（如图 7.1-50b、c），图 7.1-50d 所示接头是为了消除应力集中的影响，连接形式较好，但工艺实施较困难。



(a) 带加强板插入式接管



(c) 平置式接管，焊缝单面焊透



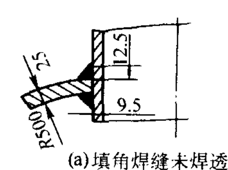
(b) 贯穿型插入式双面焊缝焊透为佳

(d) 带喇叭口型中间接管式对接缝单面焊透

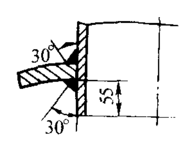
图 7.1-50　容器上支管焊接方式

当考虑到压力容器的载荷性质为低周循环疲劳载荷时，疲劳破坏多发生在结构不连续处，如截面突变、开孔、转角、焊缝与焊接缺陷、法兰连接等处；而支管与容器连接处的应力集中系数 $K_T = 2.0 \sim 4.0$，因而可能降低容器的疲劳强度，其影响程度决定于连接的具体形式及工艺措施。实验研究表明，带加强圈的插入式接管连接形式对疲劳强度的降低程度最大，平置式接管放置于容器外表面（焊缝单面焊透）次之，插入式（见图 7.1-50b）较好。贯穿性接管并双面焊时，由于工艺不同（见图 7.1-50）也会有不同结果（见表 7.1-24）。图 7.1-51 中的支管 $\phi = 175$ mm，贯穿长度长 55 mm，图 7.1-51a 为两条填角焊缝；图 7.1-51b 有一条剖口焊缝；图 7.1-51c 为从两面焊透且在焊缝表面进行加工；图 7.1-51d 为一条深剖口焊缝并焊后加工，另一条不加工。四种接头在循环特征 $r = 0$ 的动载作用下进行试验，其结果如表 7.1-24 所示。实验表明，焊缝焊透且外表面进行加工成平滑过渡，应力集中小，疲劳强度高；图 7.1-50b、d 增厚高度大，过渡区产生裂纹，疲劳强度大为降低，因此要尽量减小应力集中程度。

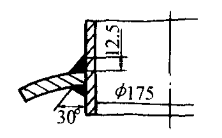
其他未能述及的问题，请参照《钢制球形储罐》(GB12337—1998) 有关规定处理。



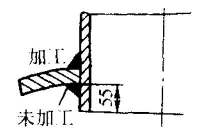
(a) 填角焊缝未焊透



(c) 剖口焊透、表面加工



(b) 单面剖口、未焊透



(d) 单面深剖，焊后加工；另一面不剖口，不加工

图 7.1-51　贯穿型接管（单位：mm）

表 7.1-24　支管接头的动载试验

接头形式	循环次数 N
a	$(0.5 \sim 1.0) \times 10^5$
b	$(0.3 \sim 0.4) \times 10^5$
c	$(1.5 \sim 2.0) \times 10^5$
d	$(0.3 \sim 0.75) \times 10^5$

7.3　桁架的装焊工艺问题

桁架是常用的焊接钢结构之一，多用在桥梁、起重机、输电塔架等结构中，特别在建筑方面尤为广泛。图 7.1-52a、b 所示为建筑桁架，图 7.1-52c 为起重机桁架。图 7.1-52d 表示在集中力作用下弦杆节距的负荷情况。

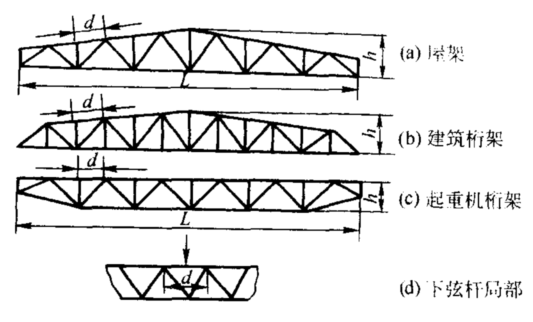


图 7.1-52　大跨距桁架

桁架节点间距离 d 一般为 1.5 ~ 3 m，桁架高度与跨距之比 $h/L = 1/10 \sim 1/14$。对于起重机桁架，节距 $d = 1.5 \sim 2.5$ m，$h/L = 1/12 \sim 1/18$。起重机桁架因承受移动载荷并伴有小能量多冲击，因此制造质量要求与屋架等相比要高得多。

7.3.1　结构特点

1）平面结构或由几个平面桁架组成空间构架，如电视塔即是，通常是平面受力。

2）杆件多，焊缝多而且短，难于采用自动焊。

3）整体看来，对称于长度中心；在受力平面内有较大的刚度，在水平平面内，刚度小，易变形。特别容易扭曲。

7.3.2　技术要求

1）节点处是汇交力系，要求平衡，因此各元件中心线或重心线要汇交于一点；

2）各片桁架要求保证高度、跨度、特别是连接及安装



接头处；

3）要求保证挠度，防止扭曲。

7.3.3　桁架生产中的主要工艺问题

（1）装配方案的选择

在工厂生产中，桁架的装配工时占全部制造工时的比例很大，这将严重影响生产率的提高。工厂装配方法有下列四种。

1）放样装配法　在平台上画出各杆件位置线，之后安放弦杆与节点板，竖杆及撑杆等，点固并焊接。这种方法适用于单件小批生产，生产率低。

2）定位器装配法　在各元件（型钢）直角边处设置定位器及压夹器。按定位器安放各元件，点固并焊接。注意定位器之安置应保证桁架取出方便。这种方法适于成批生产，降低了工人技术水平的要求，提高了生产率。

3）模架装配法　首先采用放样装配法制出一片桁架，将其翻转180°作为模架（相当于胎具），之后将所要装配之各元件按照模架位置安放并点固，在另一工作位置焊接，而模架工作位置上可继续进行装配。这种装配方法，也称为仿形装配法，其精度较定位器法差；如与定位器法结合使用，效果将更好。

4）按孔定位装配法　这种方法适用于装配屋架，因屋架两端及其脊部（即上弦杆上平面都有安装连接板，其上有螺钉连接孔，如图7.1-53所示），装配时，先定位各带孔的连接板，这就确定了上下弦杆之位置。并且保证了整个桁架，安装连接尺寸（如跨度、高度等）。其他节点处如有水平桁架而带孔者，仍按孔定位；无孔者，则用垫铁或挡铁定位。

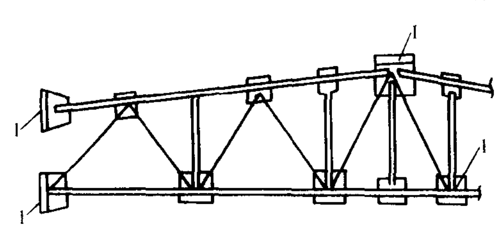


图7.1-53　屋架

采用上述各种方法装配的桁架，在焊接前必须检查几何尺寸，都须保证节点处各元件的中心（或重心线）线汇交于一点，一般结构装配之劳动费用约占总造价的30%～35%。如采用模架装配，其劳动费用可降低到仅为总劳动费用的20%。

（2）桁架的焊接

桁架焊接时的主要问题是挠度和扭曲。由于桁架仅对称于其长度中心线，故焊缝焊完后产生整体挠度；在上下弦杆节点之间，也可能产生小的局部挠度（对于单片式桁架，可能有超出平面的水平弯曲）；由于长度大，焊缝不对称等因素也可能产生扭曲，所有这些变形都将影响其承载能力。因此，桁架在装配焊接时，要求支承基面要平（<3～4 mm），焊接尽量在夹固状态下进行。

为了保证焊接质量和减少焊接变形，可遵从下列原则：

1）从中部焊起，分别同时往两端支座处施焊；

2）上下弦杆同时施焊为宜；

3）节点处焊缝应先焊端缝，次焊侧缝，如图7.1-54所示。焊接方向应从外向内，即从竖杆引向弦杆处；

4）焊接节点时，应先竖后斜（按图7.1-55中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ次序），两端侧缝也可按Ⅰ杆形式焊接，但在焊接焊缝1时，焊缝2应事先点固，以防变形，焊后变形超差时，应选用火焰矫正。

桁架生产的关键之一是节点的焊接，该处各焊件所承受的不同性质的轴向力汇交于一点，应力状态复杂，焊缝多而

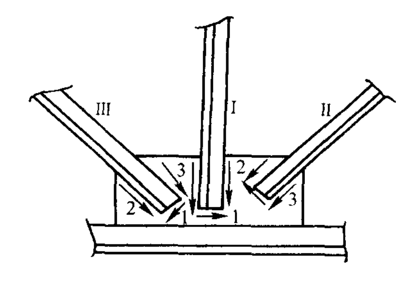


图7.1-54　节点焊序

且短，位置不利于施焊，极易造成应力集中。要求两焊缝间最小距离≥4K，K为焊脚高度，每条焊缝的最小长度≥30 mm。节点板向撑杆或弦杆的过渡要求和缓，如图7.1-55所示。和缓的趋势应与力流从基本构件向节点板传递的条件相适应。图7.1-55a、c较好，其过渡区段的和缓外形使应力集中情况显著降低。值得注意的是图7.1-55b，虽有和缓外形和弯曲翼板，但不能很快消除应力集中。这是因为其和缓外形并不能和本条件下力流传递条件相适应，且弯曲翼板并不参与节点板力的传递，故而使得节点板中部的应力集中仍然明显存在而且制造困难。由此可见，在施焊过程中任何小的疏忽，都将使应力集中现象严重并可能导致裂纹产生。

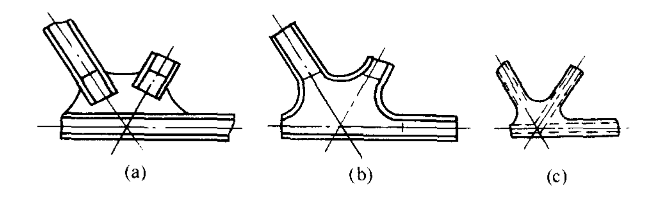


图7.1-55　节点板和缓过渡形式

制造大型桁架时，为适应起运设备能力或便于组织生产，可以分段制造，然后连接合拢。但要注意利用临时撑杆消除连接处的变形（弦杆将因角变形而错位），以防合拢困难。屋架分段制造时，中间用安装螺钉固定。一般桁架分段制造时，接头不应在长度中心处，错开距离为$L_K/3\sim4$，L_K为跨距。

7.4　管子结构的装焊工艺问题

钢管作为受力构件的主要优点是：①受压时，抗失稳能力强，因为管子截面的惯性半径在各个方向上都是相同的，而且比同样重的型钢大得多；②抗扭刚度大，可用较薄的管壁而不发生局部失稳；③钢管的表面积小，减少了锈蚀作用。经验证明，与承载能力相同的双角钢构成的表面积比较，要小50%，还能用密封管口办法，防止钢管内壁生锈；④管结构的质量轻，与相似轧制材料制成的焊接结构比可以小20%～50%；⑤管结构抗风雨能力强。

管子结构的主要缺点是造价较高，但是像板材、型钢一样，在我国已成为一种普遍的材料，并有专门的制造工厂，制造结构时可以采用无缝钢管，也可以采用焊接钢管。

管子结构主要用在要求尽量减轻重量、刚度大（如屋架、起重机等）、外形美观和节约材料的地方。管子结构除了作为受力构件外，在管道和各种容器中应用也非常广泛，特别是在锅炉构件和海洋平台等结构方面。

各种管子的连接及节点见图7.1-56。直径相同的管子的连接通常都设计成带有V形坡口的对接焊缝（图7.1-56a），但图7.1-56b型的斜对接制造麻烦，浪费材料，一般不推荐。图7.1-56c是两个半圆形搭板加强的管子接头，这种接头对承受动载和在低温工作条件的结构不允许采用。只有在承受常温静载或非受力构件中，且在位置不利的安装接头上才应



用，当某种构件很长（如输油管等）或圆筒形直径相同的大批大量生产的构件可以采用螺旋形焊缝（图 7.1-56g）。从受力角度分析，采用螺旋型焊缝与相同质量的环焊缝比较，它是更可靠的。而从工艺观点出发，螺旋型焊缝更便于机械化和自动化的生产。不同直径的管子连接，可以把它套起来焊接（图 7.1-56d）或者利用一块补助板（图 7.1-56e），但这种接头同样不允许在承受动载和低温条件下工作的结构中存在。最好的办法是把大管的直径在连接处收缩到和小管的直径相同（图 7.1-56h），然后焊接。

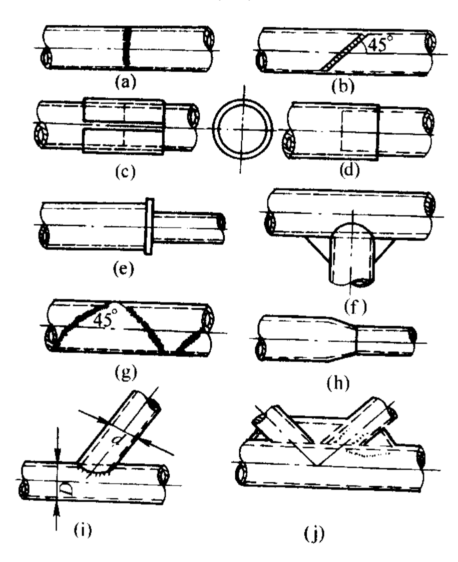


图 7.1-56 各种管子接头

在容器、管道中，经常用立体形管子接头（图 7.1-56f、i、j）。一般将支管直接焊到主干管上，为了防止主管受局部应力的有害影响，支管的直径（d）不应小于主干管直径（D）的 1/4。如果有必要，可采用加肋（图 7.1-56f）、套管（图 7.1-56d）或加强环来实现。这种空间接头，最好把支管端部稍制偏平，使截面成为椭圆形是很有利的。否则由于局部应力的影响，可能使结构在承载中造成破坏，这可以从下面的两个例子中被证实。

1）图 7.1-57 所示的管子连接，在受拉力时，2、4 点出现极高的拉应力，1、3 点出现压应力。这是因为中间一段在横向拉伸时，2、4 两点传递载荷直接的原故，实验证明：在 -60℃时，受拉伸外力作用产生的平均破坏应力远低于材料的屈服极限，而断口显示脆性，此接头看来没有严重应力集中，而是由于载荷的传递不合理而造成的。

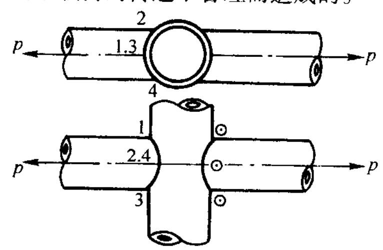


图 7.1-57 管接头受力示意图

2）图 7.1-58 为罐体排油三通管的连接，两管的直径相等（114 mm）。为了进行主管与支管对接，必须在主管上开一孔口，其深度为主管的半径，如图 7.1-58a 所示的形式进行了焊接，在冬季运行过程中，主管积水而结冰，由于冰的胀力使主管壁破裂，裂纹从主管的 2、4 开始，沿着主管向纵向扩展，造成破坏的原因是：

① 冰的胀力使主管壁承受平面拉应力，在 2、4 点垂直于焊缝的平均拉应力等于 1、3 点垂直于焊缝的拉应力的两倍；

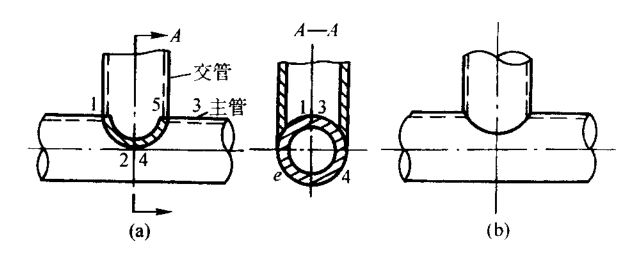


图 7.1-58 三通管接头形式

② 焊接质量不高，对接焊缝用手工焊单面焊接，根部会出现未焊透等缺陷；

③ 为了满足与支管的对接，在主管上须开一个圆形孔，因此 2、4 点形成严重的应力集中；

④ 温度低使材料的变形能力变差，因而造成破坏。

经过研究改成图 7.1-58b 的形式。即在 2、4 点支管的内径与主管的孔口边缘相交，就是主管与支管的连接最低点上移，实际上相当于变成一个椭圆形的孔，则大大降低了 2、4 点的应力集中程度，经过实际运行的考验，结果是安全可靠的，从而证明开成椭圆形孔是有利的。

当用管子制造桁架时，其节点形式除图 7.1-56h、i、j 外，图 7.1-59 中各图均为常用节点。图 7.1-59a 为对接连接，图 7.1-59b 是通过节点板避免了焊缝交叉集中。图 7.1-59c 为复杂节点，中间置一圆球，各管子端部均与球面垂直焊接，可能有一根管子是贯穿球体的。管子结构在安装状态下焊接则要求全位置施焊，特别是压力容器管道，焊工一定要经过培训和考试合格，才允许焊接产品。

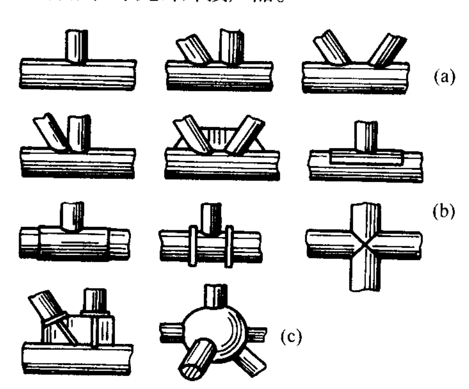


图 7.1-59 管子桁架的节点形式

图 7.1-60 是北京某大厦（总高为 95.2 m）的顶部金属结构，其骨架全部由无缝钢管焊接制成。由于该结构尺寸与重量均较大，高度较高，在地面制造后整体吊装几乎是不可能的。对其制造工艺方案分析论证后，决定除节点球体及其管座（管座是工艺性设计，原结构设计无此形式接头）在地面放样制造并确定各管件位置外，各管件与节点的装配焊接工作，全部在大厦主体结构（钢筋水泥结构）楼顶平面上进行。

该结构整体上是上小下大的六面截锥体形格架式结构，在具体施工时，将会出现下述问题。

1）该格架结构在空间有六个球形“节点”，形成六个空间汇交力系，各管件的几何中心线应在节点（空心圆球）中心汇交于一点，否则由于球体较大（直径 ϕ800 mm × 25 mm），引起较大偏差后，将在球体上产生较大的附加应力；另一方面，各管件本身的尺寸与重量也比较大（除主支撑管直径为 ϕ530 mm × 20 mm × 4 200 mm 外，其余各管直径



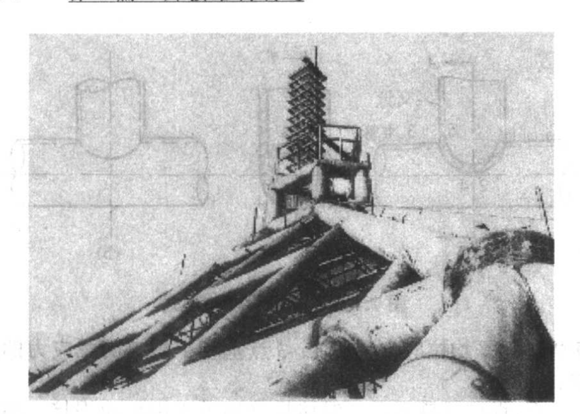


图 7.1-60　某大厦的顶部金属结构

分别为 ϕ450 mm × 15 mm × 21 000 mm、ϕ299 mm × 25 mm × 14 000 mm及 ϕ450 mm × 15 mm × 15 000 mm）在装配时偏差稍大调节就很困难。

2）除顶部的六面柱体质量较轻（4.7 t）可用现场塔吊整体起吊在地面按部件制造外，下部的六面截锥体由于重量很大，无法在地面上预制成部件，仅能将诸多管件吊到大厦顶部现场拼装，这将延缓施工进度，也可能产生较大的尺寸偏差。

针对上述问题，施工中采取了如下技术工艺措施。

1）考虑到节点球体直径较大、壁厚相对较薄、多向受力且管件直径较大的特点，将球体内部的单肋板改为“十字形”肋板以加强球体刚性；另一方面经放样验证，为尽量减少焊缝交叉与密集程度，同时还要保证格架外部玻璃幕墙的顺利安装，将球体直径由 500 mm 加大到 800 mm。

2）球体在地面制造完毕后，经放样确定处在同一水平平面上六个节点球体上的水平管件与各球体的相交角度与相交位置，力求能在球上画出实际相交线；用同样放法确定节点处各上下斜管与球体的相贯线。由于各斜管是三维倾斜，必要时需将已焊好的六面柱体的下部六角形管件架立于适当高度，采用“预装”方法，以确定斜杆与球体及六面形管件的相贯位置。

3）在六个球体与各向管件的相对位置确定后，除垂直支撑管件外，各水平横管与斜管均先切割出与球体的相交形状（在预装条件下进行），在距球体表面 250 ~ 300 mm 处切割出各项管件的管座，具体切法见图 7.1-61。将各“管座”预先点固或焊接在球体上，以利于各项管件在现场组装时便于与球体连接并调节各管件的位置。在组装各节点时应遵循的原则是：在尽量保证各管件汇交于节点中心的前提下，适当降低焊口间隙与焊缝之间的距离，力求将各上斜管件的位置偏差集中在与顶部六面柱体的连接处。

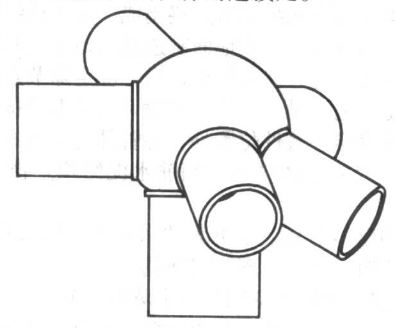


图 7.1-61　球形节点接头示意图

4）工地组装时，先在楼顶平台上竖起由管件组焊成长方形的安装立柱，高度为 23 m；将顶部六面柱体沿安装立柱提升到其设计高度的精确位置后，用焊接方法将其固定在安装立柱上。

5）组装长六面截锥体时，先将处于两个较大斜面上的四个带有支撑主管的球体安装到位，再分别组装正、背面的两水平横管（ϕ450 mm × 15 mm × 21 000 mm）。之后，组装长六角形两顶点的球体，最后组装水平位置的四根斜向横管，从而完成了六面截锥体底部的长六角形框架的拼装。

6）组装下部长六角框架与顶部六面柱体的连接斜管时，按先长后短的次序进行。先组装两根长斜管（ϕ450 mm × 15 mm × 15 000 mm），检查角度及与球体中心交于一点情况，将可能有的偏差调节到与六面柱体的连接处并适时修正；再组装四根短斜管（ϕ450 mm × 15 mm × 12 000 mm）。检测几何形状及尺寸，调节合格后进行刚性点固焊。

从图 7.1-60 上可以看出：六面截锥体的主要骨架装配完成后，还有许多较小的管件（ϕ299 mm × 25 mm、ϕ299 mm × 12 mm、ϕ273 mm × 9 mm 等）需要组装，焊接工作应在所有管件全部组装完成后进行。

7）六面截锥体的焊接次序总体上应是先小后大，即先焊小直径管件与水平横管及长、短斜管的连接焊缝，再焊六根水平横管与六个球体的连接焊缝，六个节点球体上焊缝全部焊完后，然后焊接六面截锥体与六面柱体的连接焊缝，最后拆除处于截锥体内部的安装立柱。

前述组装焊接工艺方案实施后，该大厦整体包括土建结构、顶部钢结构及其外表面的玻璃幕墙在规定期限内，提前并优质地完成了施工任务，获得了国家建设部 1998 年颁发的“鲁班奖”。

7.5　机器结构的焊接工艺问题

这里所讨论的焊接机器结构包括机器零部件、机床的床身、底座、机体、梁、柱和铸锻结构改为焊接结构以及铸焊、锻焊复合结构等。其种类和特点虽然不尽相同，但这类结构的共同特点是它们绝大多数都是由单纯的铸造结构改为焊接结构的。

机器结构采用焊接结构的优点，是可以把庞大的铸造或锻造结构首先化大为小，然后以小拼大，使制造过程简便、经济且不易产生废品，既节省了材料，又提高了效率；对设计者来说，采用板焊结构更容易设计出合理的结构形式。因此，对这类结构的研究和处理，首先是从合理设计入手，然后针对焊接工艺特点，提高这类结构的工艺性问题。

焊接机器结构多数具有较复杂的形状，而且轮廓尺寸较大，工作应力较低，因此设计时不是根据材料的强度条件，而是按其刚度条件设计的。某些结构的壁厚较大，给焊接带来一定困难，工艺处理的重点应是尽量降低焊接残余应力，防止裂纹，保证变形符合技术要求等。另一些结构的钢板较薄，须予加强以提高刚性。图 7.1-62a 为滑动轴承支座；图 7.1-62b 为减速器中的滚动轴承支座；图 7.1-62c 为焊接拉杆；图 7.1-62d 为钢丝绳卷筒；图 7.1-62e 为内部加助以加强刚度的鼓筒；图 7.1-62f、图 7.1-62g 为卷筒封头与筒体的连接形式；图 7.1-62h、图 7.1-62i 为焊接减速器壳体及 A—A 截面，图 7.1-62j 为两种形式的带实心轮辐的焊接齿轮；图 7.1-62k 为带有焊接对接接头轮毂的齿轮，其轮辐为虚腹式以减轻重量。这类结构的类型很多，这里就其焊接工艺问题做简要分析。

7.5.1　焊接变形与残余应力

绝大部分的焊接机器构件都经过机械加工，在安排工艺时，如果焊后加工，可以节省机械加工工时，但须注意消除焊接残余应力对加工精度的影响，特别是焊接机床，减速箱等，残余应力过大将影响其使用精度。如果先初加工，然后焊接，再进行精加工，虽然这样多了一道初加工工艺，但对薄板来说，为了控制其焊接变形或便于装配焊接，这样安排



仍是合理的。

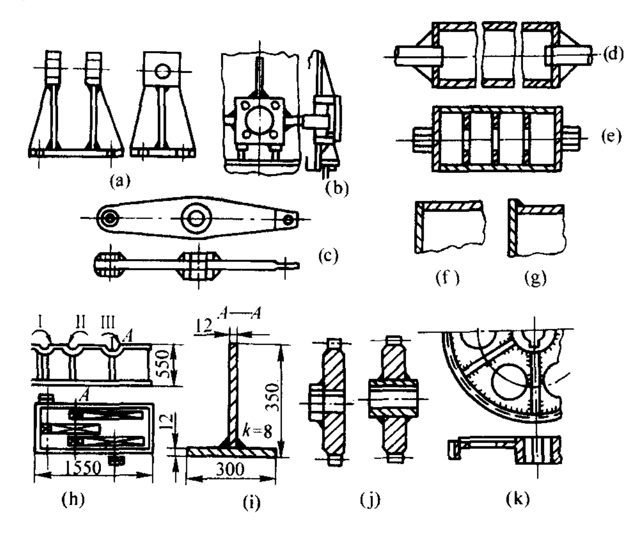


图 7.1-62　焊接机器零件图

一般说来，对薄板或较薄板（厚度在 12 mm 以下），焊接时以控制焊接变形为主，慎重选择焊接参数，顺序及方向，以焊后不修理或稍做修理矫正即可满足技术要求为原则；对由中等厚度以上的钢板（壁厚在 18 mm 以上）进行焊接时，考虑到具体结构的特点，往往因其刚性较大、不易产生变形而以控制焊接残余应力为主，除尽量降低应力外，尚须注意由于残余应力的重分布而使焊接机器丧失精度的问题，必要时须去应力处理后方可进行最后精加工。

焊接中厚板时对焊接变形仍须予以重视，如果焊接工艺处理不当，一旦变形超差，因为机件的刚度较大，要对变形进行矫正有时是相当困难的。

焊接机件是否需要消除残余应力，决定于机件的设计精度和使用要求。例如滑动轴承座，起重机或牵引机的钢丝绳卷筒等，尽管是机械加工件，但要求精度较低，二次变形后不影响其工作性能，因而不需要消除应力处理。对于机床床身，焊接齿轮，减速器箱体等机件，二次变形将使它们损失精度，严重的甚至不能继续工作，因而需要消除残余应力以保证其尺寸稳定性。去应力处理可以是整体的，也可以是局部的；可以是热处理方法，也可以选用其他处理方法，应根据机件的技术要求及制造技术能力确定。

7.5.2　消除应力集中，提高疲劳强度

焊接机器结构绝大部分都承受动载荷，如果焊接接头存在引起应力集中的内外工艺缺陷，将大大降低机器结构的疲劳强度。为了提高机器结构的抗疲劳能力，通常采用以下措施。

1）在焊接部位进行打磨加工或电弧重熔修整，使焊缝向母材圆滑过渡；

2）尽量采用对接接头与平焊位置，将缺陷发生率降至最低程度；采用其他接头形式焊接角焊缝时，不应依靠加大角焊缝横截面来提高疲劳强度。

3）在机器构件上垂直于主应力方向不应布置焊不透的对接焊缝或长槽形咬肉的角焊缝，这种位置的应力集中现象，将加速机器构件的疲劳破坏。当在机器构件受拉应力区往往焊有肋板、隔板或其他零件时，要注意这些焊缝的处理。如图 7.1-63 左边 1、2 两处也焊接，从而形成封闭焊缝，处理不当可能在该处产生裂纹；如在该处打磨使之圆滑过渡，或者该两处不焊且将焊缝的起弧和熄弧处引向翼板并打磨，疲劳强度将大为提高。浪江桥主梁（工型截面）肋板与腹板下部水孔处的焊缝，曾因与此相类似的细部处理不当，在运行不长时间后即产生裂纹并向腹板扩展的教训，可以引以为戒。

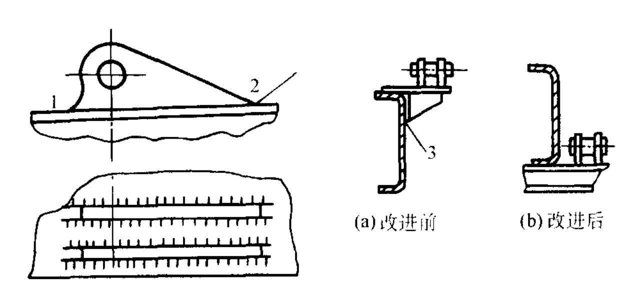


图 7.1-63　焊接零件局部构造改善

图 7.1-63a、b 是挖掘机悬挂式皮带机架，其侧壁为用钢板成形的槽钢，托架在肋板 3 处既易造成应力集中，又因壁板较薄而形成应变低频疲劳，因此常常发生裂纹；如把悬挂点从侧壁移到机架底部如图 7.1-63b 所示，将使悬挂集中力对机架的影响降至最低，提高了机架的抗疲劳性。

4）尽量降低焊接接头刚度以防止裂纹产生或残余应力过大。具体措施如图 7.1-64 所示，对于飞轮，在轮辐板上开孔以降低辐板与轮毂连接的刚度；对于液压件工艺孔堵头，在其上加工盲孔也降低了连接刚度，避免了裂纹。

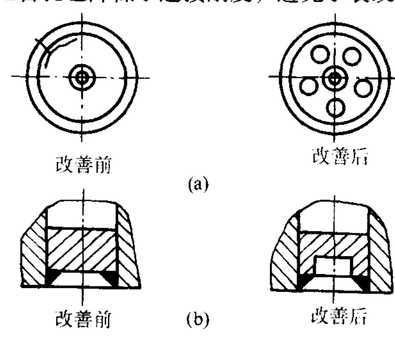


图 7.1-64　改善接头刚性

7.5.3　提高结构承载能力

焊接机器结构多为钢板结构件，它对与其平面垂直作用的弯矩特别敏感。为了提高结构的整体或局部稳定性，常将肋板布置在结构的刚性部位。肋板的合理设计与正确施焊，将使整个结构紧凑而经济，从而减轻质量，提高承载能力。在起重机主梁内部，为了提高刚度和稳定性，布置横肋、小肋板、支承肋板及纵向肋等。如果处理不好，反而会费工费料，并且容易产生应力变形和各种工艺缺陷。如图 7.1-65a 的肋板布置不如图 7.1-65a′；而图 7.1-65b 的肋板布置不如 b′；图 7.1-65c 用槽钢固定轴承很好，它构成空心封闭结构，各个方向刚度都高，且制造方便；图 7.1-65d 用方钢钻孔代替轴套及肋板则又改进了一步；图 7.1-65e 用辐射形肋板，焊缝多而密集，不好；而图 7.1-65f 用两块侧板取代辐射肋就改善了工艺，省工省料，非常合理。

在焊接机床床身结构中，除了要求尺寸精度稳定外，还要具有与铸铁床身不相上下的抗震性，这只有借助肋板的形状和布置来解决问题。因此，在焊接床身结构中加肋形式可以采用 X 形、波浪形与锯齿形等。总之，随着焊接机器结构的日益推广使用，加肋问题的进一步研究和合理布置，将具有重要的经济效益。

焊接机器结构的另一个重要内容是复合结构的工艺问题。这类结构是常用铸、锻、冲等工艺方法制造毛坯，再利用焊接方法实现以小拼大的连接而制造的结构，称之为复合结构或复合工艺结构。它吸收了铸、锻、焊各个工艺方法的优点，而避开它们的不足之处，因此，在对复合结构进行工

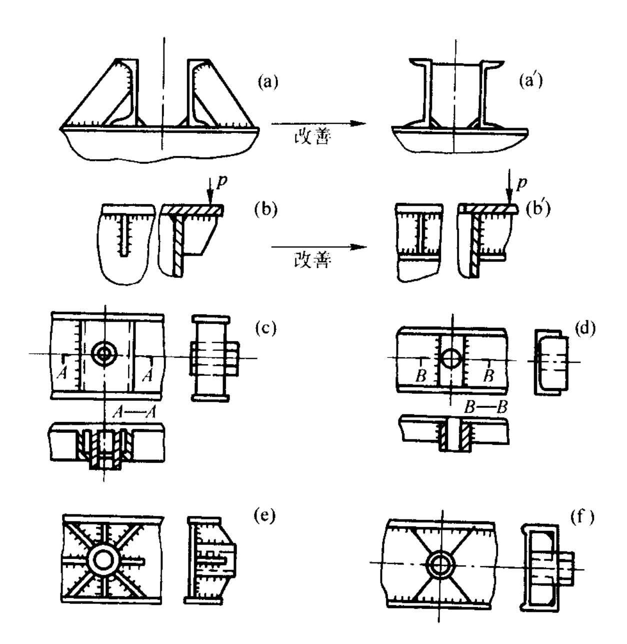


图 7.1-65 助板布置

艺审查或准备时，应考虑以下问题：

1）结构是否满足服役条件对其提出的强度、刚度、稳定性和其他根本性技术要求；

2）对大型铸、锻坯件进行工艺分析时，需根据工厂生产能力进行恰当的分段并合理连接；必要时可对结构形式进行合理修改以简化工艺，减轻结构质量，并充分利用铸、锻、焊工艺的优越性；

3）选择先进的铸、锻、焊工艺方法，但须根据生产类型，考虑经济效益；

4）焊接应力和变形的影响。复合结构的坯料都是大厚件，焊接后变形超差是很难矫正的；另一方面，焊接将在较大的刚性和拘束条件下进行，为防止产生焊接裂纹等缺陷并须注意降低焊接残余应力。图 7.1-66 为船舶上的尾架，它是铸件，将其整体铸造是困难的，因为需要大型设备且工艺复杂；若将其分成五段铸造（其横断面为 200 mm × 300 mm）然后用电渣焊方法连接起来，一般小工厂即可生产，但工艺上需要注意连接缝不要在变断面处。

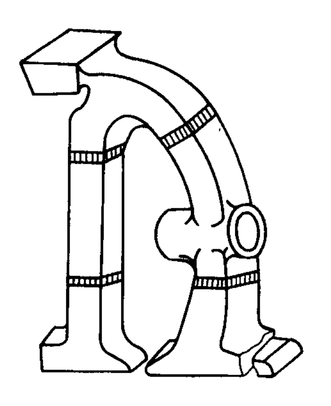
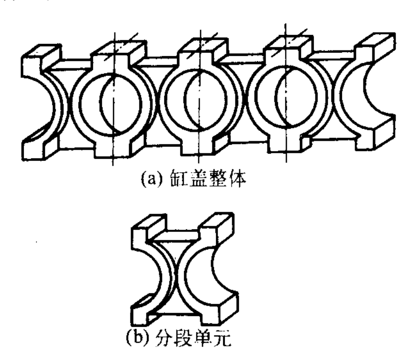


图 7.1-66 船舶尾架

图 7.1-67 为内燃机汽缸盖，它是锻造成形的，但如整体锻造几乎是不可能的，即使能够整体锻造，工艺上也是不可取的。如将其按点划线划分为四段，每段如图 7.1-68b 所示，经模锻后再焊接成整体。之所以要进行模锻，是因为需要锻出凸台，并增加需要加工处的厚度。这样，既可不需大型锻造设备，又可提高工效，而且焊接接头恰恰处在焊接量最小且容易实施的部位，可以省工省料。

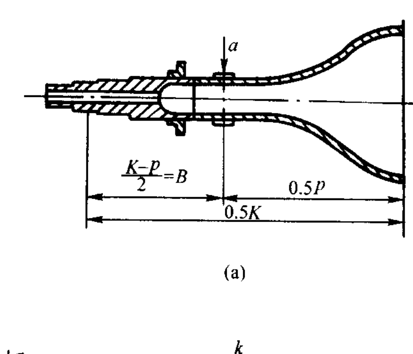


(a) 缸盖整体

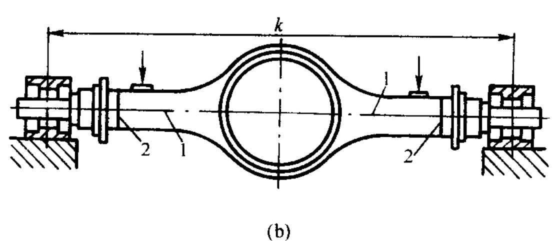
(b) 分段单元

图 7.1-67 内燃机汽缸盖

图 7.1-68 为重型汽车后桥齿轮箱，它是一根空心横梁，横梁由两个半片的模锻件用纵向焊缝连接。图 7.1-68 中焊缝 1 是联系焊缝，不需要计算强度；枢轴是通过受力焊接接头与齿轮箱横梁连接的，焊缝 2 是用摩擦焊焊成的。



(a)



(b)

图 7.1-68 载重汽车后桥齿轮箱

采用复合工艺结构还有汽轮机转子、小型水压机横梁等。

复合结构的进一步发展是钢与钢筋混凝土拼合成的混合结构，钢筋混凝土部分主要承受压力，它与钢板或钢架是通过档饭、螺钉或钢筋互相连接，连接部件主要承受切力。捷克斯洛伐克曾用混合结构建造了公路桥梁，桥梁的上翼板是混凝土的，结构高度不大，刚度很大，下翼板是钢板焊成。采用这种结构，节省了钢材，而且承受冲击和疲劳载荷的能力也是相当良好的。

美国的 68 000 吨水压机的加压部分用钢筋混凝土，水缸固定在钢筋混凝土框架上，框架是厂房的一部分。水压机工作时，厂房墙壁起柱子作用，该部分厂房长 36.6 m，宽 24.4 m，高 15.25 m。

我国在机床制造方面也曾采用过钢筋水泥床身，收到一定效果。

编写：张建勋（西安交通大学）
黄蓝林（西安交通大学）



第2章　焊接生产专家系统和CAPP

1　焊接工程应用软件概述

1.1　计算机技术与焊接生产信息化

半个多世纪以来，计算机技术获得了巨大的发展和广泛的应用，渗透到国民经济的各个领域，进入政治、经济、国防以及人类社会生活的各个方面，推动了各行各业的信息化。网络技术的发展更加促进了信息化进程，网络使得信息得以集中管理、高速传输、方便共享，提高了信息的利用率和安全程度。目前，除少量计算机仍用于数值计算外，绝大多数计算机作为信息存储、处理、加工和传输的工具。

近20～30年来，计算机技术在传统的机械制造业中也获得了广泛的应用，如计算机辅助产品设计（CAD）、计算机辅助工艺规划（CAPP）、计算机辅助制造（CAM）、计算机辅助信息管理系统（MIS）、办公自动化（OA）等，将这些技术进行综合和集成，则构成计算机集成制造系统（CIMS）。计算机技术的应用使传统的机械制造业正在经历着一场革命，促使其向先进制造技术发展。从国家“863”和“九五”计划推进计算机集成制造系统（CIMS）和CAD应用示范工程以来，我国在制造业信息化方面已经取得了相当进展。在此基础上，国家在“十五”期间提出了以“信息化带动工业化”的目标，由科技部组织实施制造业信息化关键技术研究以及应用示范工程，加快制造业信息化的进程。中国机械工业联合会于2002年9月在北京召开了“机械工业企业信息化会议”，以进一步推进机械行业企业信息化方面的工作。

智能化是当前信息科学技术领域中新方法、新技术、新产品的重要发展方向与开发策略之一。信息处理的智能化与信息社会对智能的巨大需求是人工智能发展的强大动力。人工智能与专家系统曾取得许多令人注目的成果，也走过不少弯路，经历过不少挫折。近年来，随着计算机与网络通信技术的迅猛发展，特别是因特网的大规模普及，人工智能与专家系统的研究再度活跃起来，并正向更为广泛的领域发展，围绕人工智能与专家系统的研究和应用开发也迎来一个蓬勃发展的新时期。

焊接技术作为机械制造业中一个必不可少的加工工艺同样也经受信息化的巨大冲击，焊接质量、生产率及成本工程等方面产生了飞跃性的变化。焊接工艺设计是一门经验性很强、技巧性很高的学科，随着焊接研究的不断深入，焊接正在向一门科学发展，已形成了一定的成熟理论和实践法则，收集和整理了很多工程应用规则和经验公式。然而，焊接工艺是随生产环境和生产发展而变化的，因而焊接工艺设计不具有精确的定义和严密的分析，具有模糊推理的性质，并且与焊接质量有关的一些指标也难以量化，因此可以说焊接工艺设计是应用专家系统的理想领域。

在焊接领域开展专家系统工作是从1985年开始的。国际焊接学会（IIW）的统计资料表明：中国、英国、美国、日本、德国、法国、丹麦、瑞典等许多国家在焊接领域的不同方面开展着专家系统的研究和应用开发工作，涉及工艺设计或工艺选择（包括单因素的焊接材料选择或焊接方法选择等）、焊接缺陷或设备故障诊断、焊接裂纹分析、焊接结构断裂评定、焊接结构疲劳性能分析、焊接预热和焊后热处理要求、焊接成本估算、实时监控、焊接CAD（疲劳设计、符号绘制等）、焊工考试以及焊接工程技术人员和焊工的教育与培训多媒体软件等，几乎包含了焊接生产的所有主要领域，是焊接工作者的研究热点之一。

许多国家自20世纪80年代以来还建立了一些和焊接有关的数据库，例如焊接母材化学成分和性能数据库、焊接材料化学成分和性能数据库、焊接CCT图库以及与焊接相关的标准和法规库等，这种数据库不断在更新、扩充。例如日本金属研究所编制的焊接CCT图库中已经收集了200多种材料的CCT图。这些数据库大部分免费通过互联网就可以查阅。此外，德国亚琛工业大学焊接研究所开发的电子束焊、气体保护电弧焊和点焊模拟系统（EBSIM、MAGSIM、SPOTSIM）可以方便地通过计算得到在特定焊接条件下焊缝的形状。这些软件有很高的实用价值。

焊接界所关心的焊接生产信息化问题，除了包括一条优质焊缝形成过程的信息化以外，还包括焊接结构生产全过程的信息化。例如焊接结构件装焊计算机辅助工艺规划（WCAPP）、焊接生产施工管理、焊接生产质量管理等。

为促进计算机在焊接领域的应用，各国及国际焊接学会（IIW）已多次举行专门的学术会议。英国焊接研究所（TWI）在1986年召开了“焊接中的计算机技术”（Computer Technology in Welding）的国际会议，至2003年已召开了13次会议。与此同时，美国焊接协会（AWS）、焊接研究所（AWI）和国家标准技术研究所（NIST）自1986年开始也组织了类似的会议，2003年在奥兰多召开了第13次会议。这些会议一般都包括：专家系统、模拟与仿真、制造过程自动化、管理和教育软件等内容，近两年又增加了网络应用和集成制造等方面的内容。1988年国际焊接学会（IIW）在维也纳召开的第41届年会的大会主题就是“Computer in Welding Technology”。此后，在IIW第Ⅻ专业委员会会议上几乎每年都有世界各国计算机在焊接领域的研究、应用以及焊接工程应用软件发展情况的报道。1994年在北京召开的IIW第47届年会大会的主题报告的题目为“信息时代的焊接”。另外，在IIW第Ⅸ专业委员会中建立了“焊接数值分析”工作组。

中国焊接学会在1986年建立了“数值模拟和CAD/CAM研究组”，后改称为“计算机应用技术专业委员会”。该专业委员会在1987、1988年先后召开过学术讨论会，以后又举办过多次活动。1989年召开了“焊接专家系统”专题学术会议。1992年、1996年、2000年先后三次承办了焊接协会和焊接学会联合召开的全国“计算机在焊接中的应用技术交流会”。2001年在第十次全国焊接学术会议上组织了“焊接与IT”专题讨论会。这些会议交流和讨论的内容反映了历年来国内许多学术单位和生产企业针对焊接研究和生产中的问题所开展的计算机应用和信息化方面的大量工作。

1.2　焊接工程应用软件的用途和分类

自20世纪80年代后期以来，针对焊接工程的需要，国内外开发了许多焊接工程应用软件。它包括两种不同类型：一种是和焊接或切割设备直接有关的、基于微处理器的控制类应用软件；另一种是独立于焊接与切割设备的、基于微型计算机的各种信息和文档处理类应用软件。但通常意义下的焊接工程应用软件一般是指后者。

国际焊接学会（IIW）根据软件的用途提出了焊接工程应用软件的分类方法（表7.2-1）。但同一用途的焊接工程应用软件，由于开发单位和使用范围不同以及依据的国家标准和行业规范不同，常常有多个品种，而且它们之间的差别可



能很大。例如对于同样的焊接过程信息和文档存储软件，在用于电弧焊、电阻焊或电子束焊、激光焊时有很大的差别，而由于开发目的和采用的开发技术不同，这类软件又可以分别属于数据库类或是专家系统类而根本不同。

为了使众多的焊接工程应用软件更合理地进行分门别类，日本焊接学会（JWS）和日本焊接工程协会（JWES），1994年在对200多个焊接企业进行调查的基础上提出了另一种分类方法（表7.2-2）。相对来说，日本提出的分类方法比IIW提出的分类方法更能反映焊接工程应用软件的多样性和特殊性。例如，日本DAIHATSU汽车公司自行开发的点焊参数计算软件就属于A4（焊接装置及系统控制，即A类中的第四子项，以下均类似）B6（焊接电源及装备自动化）C3（计算）D6（电阻焊）E4（汽车）类。然而，即使采用日本提出的分类方法也很难包含各种各样的焊接工程应用软件。但是从中可以看出焊接软件应用范围的广泛性，并且可以深入了解焊接工程应用软件的发展方向。

表7.2-1 焊接工程应用软件的分类和用途（IIW）

软件类型	软件用途	
信息存储	焊接工艺评定记录 焊接工艺规程 焊接装配工艺规程 焊接生产计划 焊工考核管理	无损检测记录 母材性能数据库 焊材性能数据库 焊接文献及技术档案检索 焊接接头设计及焊缝编号
重复计算	熔敷金属体积及焊材用量 焊接成本计算 焊接应力和变形计算 焊接结构断裂评定	焊接热过程分析 CCT图及焊接性分析 预热及焊后热处理要求 焊接结构疲劳计算
标准说明	锅炉压力容器焊接标准 ASME IX 预热及焊后热处理 BS5135、BS2633 疲劳计算标准 BS5500	焊接结构截面积计算标准 DIN18800 part1 焊接工艺标准 EN288
专家系统与咨询系统	焊接工艺规程编制 焊接裂纹分析	焊接接头性能预测
其他	培训教育 数控切割及套料系统 焊接材料成分设计	焊材及焊接设备市场信息 焊接机器人离线编程 焊缝金属组织定量识别

表7.2-2 焊接工程应用软件的不同分类依据和子项（JWS和JWES）

类型	分类依据	子项数	子项举例
A	软件用途	10	信息及文档存储、标准说明、数值计算、焊接装置及系统控制等
B	所涉及的焊接技术领域	10	焊接设计及焊接接头强度、焊接变形及残余应力、焊接填充材料和母材等
C	采用的计算机技术	8	数据库、专家系统、计算、模糊控制、神经网络、CAD/CAM等
D	针对的焊接方法	10	一般电弧焊、CO_2焊、MAG、MIG、TIG、SAW、SMAW、电阻焊、电子束焊和激光焊等
E	所应用的行业	15	造船、桥梁、建筑钢结构、汽车、航空及航天、管道、化工及压力容器、机械制造等

在各种类型的焊接工程应用软件中，焊接生产专家系统、焊接CAPP系统、焊接数据库系统是其典型的代表性应用。本章介绍焊接生产专家系统和CAPP系统，包括它们的结构、原理和应用、发展现状和趋势、开发技术和实例。下一章则重点介绍焊接数据库系统，包括发展现状和典型应用、数据库管理系统的选择以及焊接数据库系统的开发技术和实例。虽然这些内容无法包含焊接工程应用软件的全部，但相关开发技术和方法对于其他类型焊接工程应用软件的开发具有借鉴作用，并且专家系统技术和数据库技术在各种类型的焊接工程应用软件中都有不同程度的体现和应用。

2 焊接专家系统的结构和原理

人类对创造一种具有智能的机器辅助人类从事各种智能活动的梦想导致了人工智能技术的产生，而计算机的诞生为人工智能技术的研究和应用提供了强有力的工具。20世纪60年代，专家系统的出现使人工智能研究进入了一个崭新的阶段，并形成持续不断的研究热潮。专家系统的研究及成功应用，使人工智能从模型世界走向现实世界，并极大地推动了人工智能的理论研究与发展。专家系统的创始人E.A.Feigenbaum指出："专家系统是第二次计算机革命的工具"。

专家系统的研究和开发可以帮助人类专家总结并保存其经验及专门知识，博采众长，促进领域技术进步。同时，专家系统的应用又可以使这些宝贵的知识财富得以推广普及，使人类专家从繁重的重复性、事务性劳动中得到解放，极大地提高人们的工作效率与质量。然而，专家系统缺乏人类的感官意识，通常也无从经验中进行学习的能力。因此，专家系统与人类专家各有自身的优势和不足。通过开发专家系统，可以使人类专家扬长避短，将有限的精力更多地投入到创造性的劳动中去。

随着计算机在焊接工程领域中的应用越来越普及，将人工智能和专家系统的思想和技术引入焊接工程领域不仅可以从量上拓宽计算机应用的范围，而且从质上提高了计算机应用的水平。从事焊接工程领域计算机应用的广大工程技术人员正在从人工智能这一新兴学科里找到新的思想、新的方法，对专家系统研究和应用的兴趣也与日俱增。焊接工程领域的问题具有符号推理与数值计算交织、求解策略和方法多样、任务规划多层次、评价决策多方案等特征，应用于焊接



工程领域的专家系统只有结合领域特征，将专家系统理论、技术和具体应用充分结合才能使其具有一定的领域适应性。

在焊接领域开发和应用专家系统的益处包括：可降低焊接成本，比如因提高焊接工艺的编制效率而降低成本；为焊接专家提供技术支持，甚至有时可完全取代焊接专家；系统产生的所有信息均可存入数据库，进而可在任何需要的时候访问这些信息；系统可对所给结论作出解释，使用户感觉友好，易于接受；系统的结论通常基于多个人类专家的知识，因而往往更科学、更具权威性；以示教方式用于教育培训，传播专家知识；专家系统的知识库易于修改更新、可反映领域最新成果，或适应不同用户需求；专家系统的存在，可推动对领域相关知识的讨论，促进知识的广泛理解与固化。

下面对专家系统的基本特征及应用类型、一般结构及原理、以及知识的获取、知识的表示和知识的处理技术进行简单的介绍。

2.1　专家系统的基本特征

一般认为，专家系统是用于处理现实世界中提出的需要由相关领域专家来分析、判断和解决的问题的智能程序系统。领域专家之所以能够很好地解决这些问题，在于他们具有丰富的经验和专门知识，专家系统要达到人类专家解决问题的能力和水平，也必须具有相应的经验和专门知识。专家系统的知识来自特定领域的人类专家，或者是理论上的，或者是经验性的。其次，专家系统求解问题的方式是应用人工智能技术模拟人类专家求解问题的思维过程，通过推理来求解需要专家才能解决的相关领域的困难问题，并达到领域专家的水平。这使得专家系统有别于一般的程序系统和数据库系统，一般的程序系统按事先规定的路线运行，获得问题的解答；而数据库系统只是简单地在数据库中存储数据，并通过对数据库的搜索获得答案。由于知识是专家系统求解问题的基础，因此专家系统也称为基于知识的系统（knowledge based system）。

专家系统主要用于那些难于用准确数学模型描述的对象，尤其是专家的能力和经验起重要作用的问题，专家系统的优势更为明显。一般来说，一个专家系统局限在某一个专门的专业领域内，很难建立一个通用的专家系统。专家系统的基本特征如表 7.2-3 所示。

表 7.2-3　专家系统的基本特征

基本特征	特　征　说　明
具有专家水平的专门知识	专家系统中的知识一般分为三个层次，即数据级、知识库级和控制级。数据级知识是指具体问题所提供的初始事实以及问题求解过程中所产生的中间结论和最终结论等，通常存放于数据库中。知识库级知识通常是指专家的知识，是构成专家系统的基础，其质量和数量决定了系统性能的高低。控制级知识是关于如何运用数据级知识和知识库级知识的知识，它用于程序系统的运行过程及推理控制，其性能关系到系统的智能程度。为了能像人类专家那样求解相关领域的问题，专家系统必须具有专家级的领域专门知识，知识越丰富，质量越高，解决问题的能力就越强，求解的效率就越高，结论就越可信
具有有效推理能力	专家系统的根本任务是模拟人类专家的思维过程，求解相关领域的实际问题，因此它必须具有相应的推理机制，能根据用户提供的已知事实，运用知识库中的专门知识和经验，进行有效的推理，实现对问题的求解。不同的专家系统求解问题的特性与领域不同，因此推理机制也要根据问题领域的特点具体设计与确定，以获得有效解决问题的手段。同时，专家系统主要处理难度较大的不良结构问题，需运用多种启发式经验知识。这些启发式知识往往具有不完全性和不确定性，因此专家系统常常要采用不精确推理等非常规推理方法
具有知识获取能力	人之所以能成为解决某一领域问题的专家，一个重要的原因是它能在处理实际问题的过程中善于学习、分析、总结、提高，作为模拟人类专家处理问题的专家系统，也应有这种自学习的能力，不断从外界和解决问题的过程中获取知识、积累经验，增强和提高系统自身解决问题的能力和水平。目前专家系统在这方面的能力还比较弱，大多是通过建立并使用知识编辑器把领域专家的知识“传授”给专家系统，以建立知识库。其发展方向是建立自动知识获取工具，使系统自身具有学习的能力
灵活性	专家系统的灵活性表现在两个方面：首先，专家系统可以描述那些没有严格数学模型的过程，通过总结专家从实践中获得的启发式规则和因果关系，解决一些相当复杂的实际问题，并且对数据不确切、知识不完备、证据有矛盾的问题也可以获得满意的解答，这些都是传统程序难以实现的，表现出了专家系统的强大能力和灵活性。其次，专家系统采用知识库与推理机相互独立的构造原则，增加了各自建造的灵活性。对功能相似的专家系统，只要更新相应的知识库就可派生出相应的专家系统。并且知识的修改不需要修改推理机的程序
透明性	透明性是指用户应对专家系统获得的问题解答，不仅知其然，而且知其所以然，从而提高用户对系统的信赖程度。通过设置解释机构，专家系统能向用户解释它的行为及得出答案的推理过程，使用户清楚地了解系统求解问题的过程及使用的知识和方法
交互性	交互是指专家或用户与计算机进行交流、对话，一方面它通过与领域专家或知识工程师进行对话可以获取知识，另一方面它可以通过与用户对话索取求解问题所需的已知事实及回答问题的提问。由于相关知识和事实不可能一次性地完全输入计算机，也不可能是一成不变的，因此良好的交互性能是方便专家系统应用，并不断增强性能的重要手段
实用性	专家系统具有实用性是专家系统获得广泛应用的基础，它只有能有效解决相关领域的实际问题才能获得用户的认可。因此专家系统的建立必须结合领域问题的特征，有针对性地组织系统的知识库、建立问题求解的推理机制
复杂性	为了使专家系统满足特定领域的应用需要，无论是知识的获取、知识的表达、知识的运用和推理都必须结合具体问题，根据实际情况进行。由于必然存在知识的不完整性，而且人类的思维过程尚未能清晰的表达，因此专家系统的构造和开发具有相当的复杂性和难度

2.2 专家系统的一般结构

专家系统的结构与其所选择的知识表达方法及知识处理机制紧密相关，不存在一种普遍适用的结构。但一般都包括人机接口、推理机、知识库及其管理系统、数据库及其管理系统、知识获取机构、解释机构这六个部分（图7.2-1）。

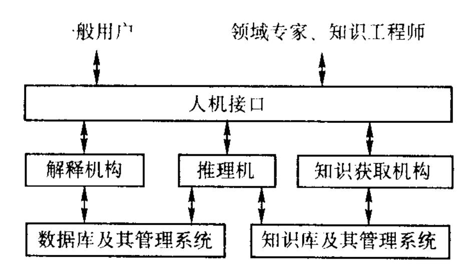


图7.2-1 专家系统的一般结构

1）人机接口　人机接口是专家系统与领域专家或知识工程师及一般用户间的交流界面，由一组程序及相应的硬件组成，用于进行系统内部表示形式与外部表示形式的转换，完成输入输出工作。领域专家或知识工程师通过它输入知识，更新完善知识库；一般用户通过它输入欲求解的问题、已知事实及向系统提出询问；系统通过它输出运行结果，回答用户的询问或向用户索取进一步的事实。

2）知识获取机构　它由一组程序组成，其基本任务是把知识输入到知识库中，并负责维持知识的一致性及完整性，建立起性能良好的知识库。在不同的系统中，知识获取的功能及实现方法差别较大，有的系统首先由知识工程师向领域专家获取知识，然后再通过相应的知识编辑软件把知识送到知识库中；有的系统自身具有部分学习功能，由系统直接与领域专家对话获取知识，或者通过系统的运行实践归纳、总结出新的知识。

3）知识库及其管理系统　知识库是知识的存储机构，用于存储领域内的原理性知识、专家的经验性知识以及有关的事实。知识库中的知识来源于知识获取机构，同时它又为推理机提供求解问题所需的知识。知识库管理系统负责对知识库中的知识进行组织、检索、维护等，实现对知识库的统一管理和使用。

4）推理机　推理机是专家系统的“思维”机构，即构成专家系统的核心部分。其任务是模拟领域专家的思维过程，控制并执行对问题的求解。它能针对数据库中的当前问题信息，按一定的推理方法和控制策略识别和选取知识库中的相关规则进行推理，直至求得问题的解答或证明某个假设的正确性。推理机的性能和构造一般与知识的表示方式和组织方式有关，而与知识的内容无关，这有利于保证推理机的相对独立性，当知识库中的知识有变化时，无需修改推理机。

5）数据库及其管理系统　数据库是用于存放用户提供的初始事实、问题描述以及系统运行过程中得到的中间结果、最终结果、运行信息等的工作存储器。数据库的内容是在不断变化的，在求解问题的开始阶段，它存放的是用户提供的初始事实；在推理过程中，它存放每一步推理所得到的结果。数据库记录推理过程中的各种信息，为解释机构提供了回答用户咨询的依据。数据库是由数据库管理系统进行管理的。

6）解释机构　解释机构是专家系统取信于用户的一个重要措施。它由一组程序组成，能跟踪并记录推理过程，当用户提出询问并需要给出解释时，它能够根据问题的要求作相应的处理，回答用户提出的“为什么?”、“结论是如何得出的?”等问题，对自己的行为作出解释。另外，通过对自身行为的解释还可帮助系统建造者发现知识库及推理机中的错误，有助于对系统的调试和维护。因此，无论是对用户还是对系统自身，解释机构都是非常重要的。

在具体建造一个专家系统时，除了应该具有上述几个部分外，还应根据相应领域问题的特点及要求增加适当的部分，如：在建造决策型专家系统时，需要增加决策模型库；在建造计算工作较多的专家系统时，需要增加算法库等。

2.3 专家系统的知识获取与表示

专家系统获得巨大成功的原因在于，它将模仿人类思维规律的解题策略与大量的专门知识结合在一起。因此，专家系统的性能水平在很大程度上取决于它所拥有的知识的数量和质量。

1）知识获取　专家系统的知识获取是指将某领域（例如焊接工程领域）的专业知识从知识源（人类专家、书本或其他资料）转移到知识库中的过程。它直接影响（焊接）专家系统的功能定义、知识表达方式设计以及推理机设计。专家系统的知识获取有三种基本途径。

① 由知识工程师与领域专家通过会谈等方式提取有关专门知识，并由知识工程师将其转化为计算机的内部表示形式。常见方法有会谈法、草案分析法和格栅获取法等。

② 专家系统提供一个智能接口，通过与领域专家对话而获取专门知识。这种智能接口通常为智能编辑器，并经常采用自然语言处理技术，智能编辑器在专家系统开发工具的设计中颇受重视。

③ 建立一个具有归纳、类比或其他高级学习功能的知识发现系统，直接从领域经验中学习重要知识。但真正实现知识发现的专家系统到目前为止还极为少见。

在专家系统开发初期，知识获取主要是通过知识工程师与领域专家的交互来完成的，其最佳方式是集领域专家和知识工程师于一体，以克服二者之间在信息交流上的障碍。当专家系统投入使用后，系统的完善工作则主要应由用户来进行。此时如仍采用第①种方式，则将给用户带来较大困难，因此应采用②、③两种知识获取途径。由于专家知识存在固有的不完全性、不确定性和隐蔽性，从而使得知识获取工作十分艰难，以致成为制约专家系统发展的“瓶颈”问题。经验表明，试图在构造专家系统之初就完全掌握某专业领域所有相关知识的想法是不足取的。为了使专家系统能够适应外界环境的变化、不断提高其解决问题的能力，就必须使专家系统能够象人类那样不断获取并积累有关的经验和知识，即知识获取应贯穿于建造及使用专家系统的整个过程。

机器学习是面向用户的一种知识获取形式，它提供添加新知识、修改或删除旧知识的手段，是提高和改善已有系统性能的重要途径。20世纪80年代以后，人们在机器学习方面开展了大量研究，提出了多种机器学习类型，如机械记忆式学习、教导注入式学习、归纳学习、类比式学习、基于解释的学习和从观察和发现中学习等。近年来，又出现了遗传算法、以人工神经网络理论为基础的连接学习等一些新的机器学习方法。由于多数机器学习类型仍难于走向实用，机械记忆式和教导注入式等较为简单的学习类型仍是目前各专家系统广泛采用的机器学习方法。

2）知识表示　知识表示就是将所获得的某领域的专家知识进行符号化与形式化的过程。知识表示方法对专家系统的性能起着至关重要的作用，它直接影响到系统的知识获取、推理能力及推理效率。通常，任何给定的问题都有多种等价知识表示方法，但它们可能产生完全不同的效果。

表7.2-4所示为常见的知识表示方法及特点。除表中所列外，人们还发展了特征表表示、判定表表示、脚本表示、



概念从属表示、直接表示、面向对象的知识表示等方法，并得到一定应用。

表 7.2-4 常见知识表示方法及其特点

知识表示方法	优　点	缺　点	适 用 范 围
谓词逻辑	表达自然、简洁，灵活性、模块性强，具有严格的形式定义，推理完备	知识缺乏组织，不便维护，不适于表达过程及启发性知识，推理过程不易理解，推理单调。在复杂系统、多种推理的情况下易产生知识库过分庞大的组合爆炸问题	适合于描述静态的事实类型的知识。常用于定理证明、问题解答、机器人学等
产生式规则	表达自然，一致性好，灵活性、模块性强，易保留动作所产生变化的踪迹	知识处理效率低，维护困难，难于表达过程性知识，难于追踪控制路径。在复杂系统、多种推理的情况下易产生知识库过分庞大的组合爆炸问题。不能提供灵敏的解释	领域知识松散，无简洁、统一的理论，处理过程可表示为一组独立的操作，易于将知识同使用知识的方法相分离，当前任务是从一个状态到另一状态的转换
语义网络	是知识的深化表达，表达直观、易于理解，具有性质的继承性、信息检索的索引功能	不能保证结论的有效性，处理程序相当复杂	根据复杂的分类进行推理的领域，需表示事件状况、性质以及动作之间关系的领域
框架	表达能力强，层次丰富，叙述性与过程性表达的协调性强，知识的组织方式有利于推理，易于实现默认推理	不易找到适合于任何情况的原型，不易适应新的情况	表示固定的事件和状况
过程	表达能力强，有模块化、层次化特点，能实现扩充逻辑推理	知识难于修改和证明，固定的控制信息限制了其他可能的方法	适于表达具有动态特点的知识

① 谓词逻辑表示法　谓词逻辑表示法是指各种基于形式逻辑的知识表示，用于表达事物所处的状态或事物之间的关系，适合于描述静态的事实类型的知识。其中尤以一阶谓词逻辑表示法使用最为广泛，其一般形式为：P（$x1$，$x2$，…，xn），P 表示状态或关系，$x1$ ~ xn 为 P 所描述的对象。

例如：heattreatment _ type（“消除应力热处理”）

/* 表示：热处理类型（heattreatment _ type）为“消除应力热处理” */

type _ of _ steel（“1Cr18Ni9Ti”，“不锈钢”）

/* 表示：“1Cr18Ni9Ti”的钢材类型（type _ of _ steel）为“不锈钢” */

基于谓词逻辑表示法的系统，其推理体系基于归结原理，即一系列公理性逻辑等值式及逻辑推理规则。Prolog 即是基于一阶谓词逻辑表示法的人工智能程序设计语言。

② 产生式规则表示法　产生式规则是目前使用最为广泛的知识表达方法，其基本形式为：

IF 条件 THEN 动作

规则的动作可以是向用户提问、执行某一程序、修改知识库的内容、同硬设备交互等。规则的条件和动作的表示无统一的做法，可以采用一阶谓词，或具有特定意义的符号串，或其他表示法。

例如：RULE（2，［is _ a（“材料”，［“20”，“20g”，“25”，“A3”］），［le（“厚度”，“50 mm”）］，［le（“预热温度”，“100℃”）］）

/* 表示：如果母材“材料”为“20”、“20g”、“25”或“A3”钢，且“厚度”大于等于“50mm”那么“预热温度”应大于等于“100℃” */

基于产生式规则的系统，其推理机制为演绎推理，它的基本处理对象为事实、关系、规则。

③ 框架表示法　框架表示法的基本思想是：人类记忆和使用知识时，通常是把有关的一些信息组织在一起形成一个结构化模块化的知识单元。框架是一种描述固定情况的数据结构，一般可以把框架看成是一个由结点和关系组成的网络。

框架的一般结构如下：

框架名
　槽 1：侧面 11
　　　　侧面 12
　　　　…
　槽 2：侧面 21
　　　　侧面 22
　　　　…
　…

框架的槽可以填以具体的数字、字符串，可以是一个谓词或过程，也可以是指向其他子框架的指针。相互关联的框架构成一个具有层次结构的框架网络。例如：

frame（“weld _ procedure”，12，
　base _ parameters（process（“SMAW + SAW”），
　　steel（“A3”），
　　joint（“对接接头”），
　　groove（“不对称 X 形坡口”），
　　thickness（“34”）），
　heattreatment（“消除应力热处理”），
　sub _ frame（“weld _ procedure _ 2”，121））

/* 这是一个表示焊接工艺的框架，框架的“槽”及“侧面”分门别类地存放各工艺参数：

“weld _ procedure”、12——框架名及框架编号

“SMAW + SAW”、“A3”、“对接接头”、“不对称 X 形坡口”、“34”（厚度）——基本工艺参数

“消除应力热处理”——热处理类型

“weld _ procedure _ 2”、121——子框架名及对应的子框架编号 */

基于框架表示法的专家系统，往往同时采用产生式规则表示法，其推理过程以框架间的匹配为特点，通常具有默认推理能力。在一个多层框架网络中，子框架可继承父框架的特性。



④ 语义网络表示法　所谓语义，是指语言学的符号和表达式同它所描述的对象（含义）间的关系。语义网络由结点和联接结点的弧构成，其中结点表示物理实体、概念或状态，弧表示其间的关系。在具体专家系统中，语义网络常与产生式规则一同使用。语义网络表示法适于描述分类学知识及其间的复杂关系，或描述关于事物特性的知识。

⑤ 过程表示法　过程表示是将知识包含在若干过程之中，以处理某些特殊事件或状况。采用过程表示的知识库是一组过程集合。知识库的修改是增加/删除子程序，或修改子程序及访问条件。过程表示适于表达具有动态特点的知识，如关于如何运用知识的知识、如何发现相关的知识并进行推理的知识等。

2.4　专家系统的推理机制

专家系统的推理机制包括所采用的推理方法及控制策略两个方面，与目标知识的内容、结构及表示方法紧密相关。根据推理的逻辑基础，推理方法可按图 7.2-2 分类。

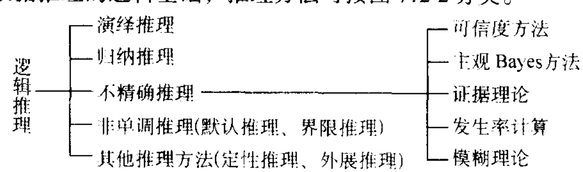


图 7.2-2　推理方法的分类

1）演绎推理　演绎推理是指由一组前提必然地推导出某个结论的过程，其核心是三段论法。是专家系统中使用最普遍的推理方法。

2）归纳推理　归纳推理是指以某命题为前提，推出与其有归纳关系的其他命题的过程。一般包括由特殊到一般的归纳、由特殊到特殊的归纳和统计三段论法。

3）不精确推理　不精确推理是在事实或知识存在不确定性、模糊性时的推理。由于专家知识、经验性知识常常具有不确定性、模糊性等特点，不精确推理成为许多专家系统的重要特征。其实现的关键，是找到一种处理不确定性的方法与算法，即建立不精确推理模型。常用的模型有：可信度方法、主观 Bayes 方法、模糊理论等。目前已有少数焊接专家系统采用了可信度和模糊推理方法。

4）非单调推理　基于经典逻辑的演绎推理，随着知识的增加，通过严密的逻辑论证和推理获得的新命题或结论总是随着推理的向前推进而严格增加的，而且不会与前面已证明为真的命题及推出的结论相矛盾。这样的推理为单调推理。然而，它并不完全符合人类认识世界的思维特征。在现实世界中，一切事物都是在不断发展变化的，人们对它的认识也就处于不断的调整中，通常要经历“认识—再认识”的反复过程。例如，当有新知识被发现、获得时，原先已证明为真的命题及推出的结论可能被否定；另外，人们通常是在知识不完全的情况下进行思维推理的，推出的结论一般带有假设、猜测的成分，缺乏充分的理论基础，因此，人们的思维推理一般不是单调的，即随着知识的增加，推出的结论或证明为真的命题并不单调地增多，这种推理即非单调推理。

非单调推理用于处理信息的不完全性，主要针对常识性问题。即当已知信息不完全时，系统能够给出依据当前信息的结论，而当增加某些新的事实时，如果该事实与以前获得的结论矛盾，则能够取消以前得出的结论。常见的非单调推理有默认推理和界限推理。由于领域专家在解决实际问题时经常会运用一些常识性知识，对常识问题的处理就成为考核专家系统能力的又一重要因素。

专家系统的控制策略主要指推理方向的控制（表 7.2-5）及推理搜索策略（表 7.2-6）。搜索策略是指推理过程中如何根据已知信息及推理目标，选取待用知识，确定具体解题路径，可分为盲目搜索和启发式搜索两种类型。盲目搜索是在没有领域知识诱导的情况下的搜索方法，适合于小目标知识空间的搜索问题。其优点是控制性知识比较简单，但搜索效率低，不便于复杂问题的求解。启发式搜索利用与应用领域有关的启发性知识来控制搜索路线，使其向最有希望的方向前进。

表 7.2-5　推理方向

推理类型	说　　明
正向推理	又称事实驱动的推理，即由原始数据出发推出结论。这种推理方式能充分利用用户提供的信息，但有“盲目推理”的倾向，需用启发性知识进行控制
逆向推理	又称目标驱动的推理，即由目标出发，为验证目标去寻找有用的证据。反向推理目的性较强，能对推理过程提供明确解释，但有盲目建立目标和子目标的倾向，并且不能充分利用用户提供的信息
混合推理	正向推理和逆向推理同时进行，而期望正向推理所获得的中间结论和逆向推理所需要的证据相同。一般来说，有效地利用混合推理可以减小对知识空间的搜索次数，大幅度提高推理的效率

表 7.2-6　常见搜索策略

搜索策略	说　　明
不可撤回方式搜索	不可撤回方式的搜索策略是，选择一条可应用的操作（如执行一条可应用的推理规则）作用于当前状态，不论后果如何都接着做下去，直至达到推理目标，或出现推理失败。该方法类似于数学中求函数极值的爬山法，其应用十分有限
回溯策略	回溯策略属于试探性方式的搜索。试探性方式的搜索策略是，选择一条当前可应用的操作，作用于当前状态，如果结果不佳，则回到应用该操作之前的状态，再换另一个操作。回溯策略的特点是，不记忆那些试探失败的操作和它们产生的状态描述，只记忆当前正在搜索的路径。该搜索策略是人工智能语言 Prolog 推理机的核心
图搜索策略	图搜索策略也属于试探性方式的搜索，其特点是，将所有应用过的操作和它们产生的状态描述都以图的形式记录下来，即保存了所有试探过的路径。由于当前可继续往下搜索的状态不只一个，因此可以从其中任何一个状态往下搜索。常见的图搜索策略有：深度优先搜索，宽度优先搜索，特殊优先搜索，最佳优先搜索，以及基于启发式估价函数的最佳路径的图搜索。后三种均属于启发式搜索



续表 7.2-6

搜索策略	说　明
与或图搜索	对于有些问题，可以将整个问题分解成子问题，子问题又可以分解为子子问题，把所有子问题、子子问题都解决了，整个问题也就解决了。这种问题求解系统称为可分解系统。可分解系统的搜索图称为与或图。与或图搜索法使推理过程更具针对性，可有效减小搜索空间，提高搜索效率。常见的解空间分解法、解空间逐步求精法，都可归于与或图搜索类型
其他搜索策略	如生成与测试法、目标空间分解法、显式控制策略等。其中，显式控制策略以知识库形式存放有关搜索控制知识（称元规则），控制策略的外在显式描述使得用户可以方便地控制推理过程，适合于复杂的人工智能系统的开发。目前这种控制方式只在少数试验性系统中得到应用

2.5　专家系统的适用领域与分类

专家系统的适用领域取决于解决问题的性质，对于计算性或有成熟公式的问题应采用常规程序系统，但如果需要解决的问题是决策性的、没有已建立的理论、人类专家缺乏或数据不精确等，则应考虑建立专家系统。而对于人类专家很多或事实已被精确了解的问题，则没有必要建立专家系统。

决策性问题是指在某一领域对于某一问题存在着几种可能的答案，如何选择出一个正确的答案。很多分类和预测问题均属于这一类，如机械制造领域中的故障诊断、机械设计方案选择、机械加工过程监测、机械加工工艺过程自动规划等。所谓“没有已建立的理论”是指对于某些问题要建立起完全的、一致的理论需要相当多的变量，以致无法用公式描述，更无法进行计算，在解决这类问题时往往需要依靠经验甚至“直觉”。人类专家的数量标志着一个国家、一个领域的技术水平，培养一个专家往往需要耗费大量的资金和时间，并且在一些应用领域，专家的知识也难以得到很好的继承，专家系统则可以很好地保存和集中人类专家的知识，在一些领域或方面替代人类专家，解决人类专家缺乏的问题，并达到人类专家求解问题的水平。如果获得的数据是不精确的，则可以运用模糊推理或其他不精确推理方法对问题进行求解，这是专家系统的特长之一

针对不同应用建立的各类专家系统，由于其功能、设计方法及实现技术等方面的不同，各类专家系统的特点，所需的技术及系统组织方法也不同。按功能及所处理问题的类型，专家系统可分为表 7.2-7 所示的不同类型。

表 7.2-7　专家系统的分类

类别	系统的功能及其技术关键
解释型	通过各种分析、推理手段，对已知信息和数据给出相应的解释。系统实现的关键是它必须能处理不完全、甚至受干扰的不正确的或完全无关的信息，并能对所得到的数据给出一致且正确的解释
预测型	根据相关对象的过去及当时的状况来推测未来情况的一类专家系统。这类专家系统通常需要相应模型的支持，并且需要进行时间推理以处理随时间变化的数据及按时间顺序发生的事件
诊断型	以对数据的解释为基础，根据观察到的情况或输入信息诊断相应对象存在的故障，找出产生故障的原因并给出排除故障的方案。要求掌握处理对象内部各部件的功能、结构，以及各部件之间的关系和相互作用等
设计型	根据设计要求，求出满足设计问题约束的配置对象，形成所需的方案或图样描述。在设计过程中，相当一部分工作是非数据计算性的、定义不完备的，需要进行推理和判断。如机械设计，要求在给定的限制条件下能给出最佳或较佳设计方案，因此必须能够协调各项设计要求以形成某种全局标准，同时能进行空间、结构或形状等方面的推理，以形成精确、完整的设计方案
规划型	按给定目标拟定总体规划、行动计划、运筹优化等。其一般要求是在一定的约束条件下能以较小的代价达到给定的目标
监测型	完成实时监测任务。随时收集有意义的信息，并能快速连续地对得到的信息进行鉴别、分析、处理，并尽快作出反应，在系统必须进行干预时发出警告信号。实际上是一个实时判断报警条件的局部诊断系统。例如，在机械加工自动线或柔性加工系统中，为了保证生产过程正常进行，加工出合格的零件，由检测系统连续地测量某些参数，如工件的尺寸、粗糙度、机床某些部分的振动和温度等，当某些参数超出一定范围时发出警告信号
调试型	用于对系统实施调试，能根据相应的标准检测被调试对象存在的错误，并能从各种纠错方案中选出适用于当前情况的最佳方案，排除错误
维修型	用于制定排除某类故障的规划并实施排除的专家系统。它能根据故障的特点制定纠错方案，并能实施这个方案排除故障，当制定的方案失效或部分失效时，能及时采取相应的补救措施
教育型	用于辅助教学，它能根据学生的特点和基础知识，以最适当的教学方案和教学方法对学生进行教学和辅导。其关键技术是具有以深层知识为基础的解释功能，能根据学生行为找出学习中存在的问题和解决办法，一般需要建立各种相应的模型
控制型	对各种大型设备及系统实现全面控制和管理的专家系统。该类系统为实现对被控对象的实时控制，必须具有能直接接收来自被控对象的信息，并能迅速地进行处理，及时地作出判断，并采取相应行动的能力
决策型	对各种可能的决策方案进行综合评判和优选，集解释、诊断、预测、规划等功能于一身，能对相应领域中的问题作出辅助决策，并给出作出决策的依据
管理型	把人工智能技术用于信息管理，以使管理信息系统及办公自动化系统达到优质、高效的管理目标，提高管理水平，在人力、物资、时间、费用等方面获取更大的效益

3 焊接专家系统的发展和典型应用

3.1 焊接专家系统的发展概况

焊接领域专家系统的研究与开发约始于20世纪80年代中期，最早报道的是美国科罗拉多矿业学院（CSM）与美国焊接研究所（AWI）联合开发的焊接材料选择系统Weldselector。随后，英国、日本、德国等国家相继都开展了这方面的研究和开发工作。

例如，英国培尔法斯特皇家学院机械工程系Tayor博士利用专家系统外壳——Savoir研制了一个船舶用钢埋弧焊工艺制定专家系统；英国Marchwood工程实验室利用专家系统外壳构造了一个蒸汽管道焊接专家系统；NEI国际燃料有限公司设计的焊接工艺咨询专家系统是利用外壳Leonard3设计的；Southampton大学用Basic语言研制了一个焊接工艺选择系统，适合于25.4 mm（1 in）厚的铝合金板材的焊接；美国Stone&Webster工程公司开发了一个焊接工艺选择系统—Welding Procedure Selection Expert System；德国的L.Dron教授等人开发的Weldex可用来帮助设计人员选择合适的焊接技术；日本大阪大学建立了一个焊接工艺选择系统；Toyo工程公司设计了一个适用于化工厂设备制造的焊接参数选择专家系统；日本Riichiro Mizoguchi等人提出了一个焊接技术专家系统的结构框图，7个独立的知识模块与一个合适的数据库和处理软件相连，构成一个大系统。

为了促进计算机和信息技术在焊接领域的应用，一些国家还单独或联合制定了专门的开发计划。

1）美国焊接研究所的焊接信息网计划（Welding Information Network—WIN） 除其他软件外，该计划主要包括焊接材料选择（Weldselector）、焊接符号绘制（Weldsymple）、预热和后热规范制定（Weldheat）、堆焊（Weldhard）、焊接工艺制定（Weldprospec）、残余应力计算（Weldstress）、复合材料联接（Joincompos）7个焊接专家系统。

2）日本大阪大学焊接研究所的焊接专家系统开发计划（WELDSYS） 该计划面向压力容器行业，主要解决有关的焊接工艺问题。参加该项研究的有日本的11个主要公司，自1985年开始实施，历时3年。随后，大阪大学又在此基础上开展了新一轮的深入研究，并将该软件命名为WELDSYS2，目前已达到商品化水平。

3）欧洲尤里卡计划EU259（EUROWELD） 该计划由英国焊接研究所（TWI）牵头，由英国、荷兰、丹麦、挪威、瑞典、德国、瑞士等国家的10个组织联合实施，包含10多个不同类型的焊接专家系统（表7.2-8）。这些专家系统以名为Xweld的焊接数据库为核心，实现总体集成。整个EUROWELD运行于SUN工作站，而各具体专家系统均可在PC机环境下独立使用。截止1992年，历时4年，该计划的大部分任务已告完成。与此同时，TWI又在酝酿一个更大规模的尤里卡计划——Total Data Management for Fabrication。

表7.2-8 欧洲尤里卡计划EU259中的焊接专家系统

名　称	功　能	开　发　者
Weldgen	焊接工艺制定	TWI（英国）
Process Selector	焊接方法选择	Nuclear electric（英国）
NDT for Fitness – for – Purpose	无损探伤工艺选择	AEA Technology（英国）
Heat Treatment	热处理工艺制定	TNO（荷兰）
High – speed GMAW Welding Procedures	高速GMAW焊接工艺制定	TNO（荷兰）
Welding of Aluminum Alloys	铝合金焊接工艺选择	TNO（荷兰）
Resistance Welding	电阻焊工艺选择	TNO（荷兰）
Fatigue Design and Crack Growth	疲劳设计和裂纹扩展	TNO（荷兰）
Joint Preparation	接头设计	Danish Welding Inst.（丹麦）
Welder Qualification	焊工资格考试与管理	Danish Welding Inst.（丹麦）
Quality Assurance and Control	质量保证与控制	Danish Welding Inst.（丹麦）
Weldsel	焊接材料选择	IVF（瑞典）
Fatigue Design and Improvement	疲劳设计	EPFL（瑞士）
Fatigue Design for Aluminum Structures	铝合金结构疲劳设计	Tech Univ. Munich（德国）

4）德国焊接研究所的信息联合焊接技术计划（Information Federation Welding Technology） 该计划准备建立一个焊接技术信息系统，包含文献数据库、实际焊接数据库和专家系统3部分。

除上述国家外，法国、葡萄牙、奥地利、澳大利亚、加拿大、捷克、爱尔兰等一些国家和地区也开展了焊接专家系统的研制或探索性工作。

我国焊接专家系统的研究开发始于20世纪80年代末，以1988年南昌航空工业学院首次介绍的“一个用于选择焊接方法的模型与其计算机ES”为起点，标志着我国开始了焊接领域专家系统的研究与开发。同期，清华大学和哈尔滨工业大学先后进行了焊接专家系统的研究。1989年11月，中国焊接学会Ⅻa与数值分析及CAD/CAM研究组在清华大学联合召开了“焊接专家系统”专题学术会议，通过交流经验，有力促进了国内焊接专家系统开发技术的普及与提高。天津大学、上海交通大学、西安交通大学、哈尔滨锅炉厂、甘肃工业大学、天津焊接研究所、大连铁道学院等单位独自或与一些企业合作相继进行了焊接专家系统的研究与开发。其中清华大学开发的“通用型弧焊工艺专家系统QHWES”和哈尔滨工业大学开发的“焊接工艺数据库与专家系统”均得到较好应用。

3.2 焊接专家系统的现状和典型应用

虽然焊接专家系统的研究与开发起步较晚，并且存在较



大的难度，但经过各国焊接工作者近 20 年的不懈探索和努力，焊接专家系统的研究开发和应用已触及焊接生产的所有主要方面，从不同侧面、以不同形式研制开发了数百种焊接生产专家系统。根据文献资料分析，这方面的研究仍方兴未艾，而且摆脱了早期的盲目性，进入成熟发展阶段。

按照应用特点，现有焊接专家系统可分为焊接工艺选择与制定、焊接裂纹预测与缺陷分析和诊断、焊接材料和设备选择等几大类型。这些系统约有 40% 达到了商品化水平。

3.2.1　焊接工艺选择与制定类专家系统

焊接工艺选择与制定是最主要的焊接专家系统应用领域，据不完全统计，近几年国内外开发的焊接专家系统中，有关工艺选择和工艺制定的约占 70%，如表 7.2-9 所示。焊接工艺涉及母材、焊接材料、接头及坡口、焊前预热与焊后热处理、焊接方法、焊接规范参数等许多因素。已开发的焊接工艺选择与制定专家系统中，有些是针对单一的工艺因素，如美国 CSM & AWI 的 Weldselector，有些则是综合工艺设计或选择系统，如英国 TWI 的 Weldgen、德国 ISF 的 MAGWIN。对于综合工艺设计系统来说，如何处理各因素间的联系和相互影响，是软件开发能否成功的关键。由于焊接工艺本身的复杂性，每个具体的焊接工艺选择和制定专家系统都有其一定的适用范围，比如特定的焊接方法、材料或焊接行业，甚至是特定的焊接设备。此外，焊接工艺问题通常与有关焊接标准、规范、规程等有密切联系，这已在不少焊接工艺选择与制定专家系统中有所反映。

除焊接工艺外，国外也有专为焊接产品的无损探伤工艺而开发的专家系统。如英国 TWI 的 Generating ultrasonic test procedures，可依据 BS3923 标准，制定超声波探伤工艺，并可解释 BS3923 标准及推理结果。

表 7.2-9　焊接工艺选择与制定类专家系统

名　称	功能类型	开　发　者	备　注
Welding Procedure Selection Expert system	工艺选择	Stone & Webster Eng.（美）	已商品化
Weldex	工艺制定	Tech. Univ. Berlin（德）	用 Prolog 开发
Weldsys/Weldsys2	工艺选择	Osaka Univ.（日）	已商品化，用 Prolog 开发
SAW Expert System	工艺制定	Queen's Univ. Belfast（英）	用 Savoir 开发，符合 BS4870
Expert Robot Welding System	工艺制定	Sicard & Levine（美）	
Infoweld	工艺制定	Wijtek（英）	已商品化
MIG EXPERT	工艺优化	Institute de Soudure（法）	已商品化
MAGWIN	工艺优化 缺陷分析	ISF（德）	已商品化 Windows
Weld Assist	工艺制定 缺陷分析	Hobart Brothers Co.（美）	已商品化
Weldplan	工艺选择	Toyo Engineering Corp.（日）	已商品化
Aluminum Welding Engineer	焊材选择 工艺选择 缺陷诊断	Carnegie Mellon Univ. Etc（美）	
Weld Procedure Selection Program	工艺选择	Southampton Univ.（英）	用 BASIC 开发用于 Al 合金
Generating Ultrasonic Test Procedures	超声探伤 工艺制定	TWI（英）	依据 BS3923
Weldselector	焊材选择	CSM & AWI（美）	已商品化
FmBASE +	焊材选择	VSB - Ostrava Tech. Univ.（捷克）	
WES	焊材选择	CIGWELD（澳）	已商品化
Gas Selector	保护气选择	TWI（英）	
焊接方法选择专家系统	方法选择	南昌航空工业学院	研究原型
焊接材料选择专家系统	焊材选择	清华大学	研究原型
铝合金焊接工艺制定专家系统	工艺选择	哈尔滨工业大学	研究原型
弧焊工艺选择专家系统	工艺选择	哈尔滨工业大学	研究原型
弧焊工艺制定与咨询专家系统（ESW）	工艺选择 工艺制定	清华大学	已商品化
焊接工艺数据库及专家系统	工艺制定	哈尔滨工业大学 哈尔滨锅炉厂	已商品化 DOS & Windows
铸铁焊修专家系统（CWES - II）	工艺选择	河北农业大学	研究原型
碳钢及合金结构钢 SMAW 专家系统（SMAWES - 1）	工艺选择	天津大学	用 INSIGHT2 + 开发
CO_2 气体保护焊工艺参数专家系统	工艺选择	天津焊接研究所	研究原型
通用型弧焊工艺专家系统（QHWES）	工艺选择 工艺制定	清华大学	已商品化 DOS & Windows

续表 7.2-9

名　称	功能类型	开　发　者	备　注
核电站弧焊工艺专家系统	工艺选择 工艺设计	清华大学	达实用水平 WINDOWS
锅炉及压力容器焊接工艺规程制定专家系统	工艺设计	甘肃工业大学	研究原型
弧焊工艺专家系统（DriAwpes）	工艺制定	大连铁道学院	研究原型
焊接工艺专家系统（HJGY－Y5）	工艺制定	湘潭大学	研究原型
压力容器焊接工艺设计专家系统	工艺设计	西安交通大学	实用原型

1）Weldselector－焊接材料选择　该软件的开发得到美国国家标准局（NBS）支持，其硬件环境和开发工具由美国德州仪器公司（TI）提供。开发工作始于1985年，其成果于1987年10月推出。

该软件适用于SMAW、GMAW、FCAW等焊接方法，可用于100多种母材种类。可根据焊接条件，选择一到数种可使用的焊接材料。该软件具有在线帮助功能，可解释推理过程中为何提出某问题，并可提供焊接工程领域内的技术性帮助。

启动程序后，用户在程序引导下，选择钢材种类、钢材牌号与级别、焊接方法、焊接位置，并回答是否要考虑氢致裂纹，还可能问及母材厚度、保护气体等情况。这些问题的编排次序与焊接专家的逻辑推理相吻合，随着用户回答这些问题，专家系统在知识库中搜寻、推理，以寻找合适的焊接材料，直到做出最佳选择，最后输出一可用焊接材料清单。使用该系统减少了选择焊接材料时的出错机会，保证了结构的安全性和可靠性。甚至非焊接专业的人也可以在短时间做出合理的选择。

Weldselector内含一数据库，存有1 200多种符合ASTM标准的钢材及相关焊材的工艺、力学性能、化学性能、焊接特点等信息。系统的推理规则以美国焊接协会有关填充金属的规范标准及其他专家知识为依据，共计150余条。

2）Gas Selector－焊接保护气体选择　该软件的研制得到英国Air Products公司资助。该软件适用于TIG、MIG、PAW（等离子焊接）等气体保护焊接方法，可以在综合考虑技术及经济因素的基础上，选择一到数种适用的焊接保护气体，并给出其在具体焊接条件下的推荐流量。

程序首先要求用户输入焊接接头信息（母材类型及厚度、接头形式、焊接位置）、焊接工艺信息（焊接方法、焊接电流、喷嘴距离、负载率、劳动成本、熔滴过渡形式）及焊缝性能要求（熔深、焊缝外形、焊道形状、飞溅水平）。在输入信息的过程中，程序提供了方便的辅助功能，比如，指出与具体材料相适应的焊接参数范围以及与给定的焊接参数相匹配的焊丝直径，推算出可能的电源负载率，提供系统所用术语的定义，给出各类示意图（如焊缝熔深形状、接头形式、焊接位置）等。

输入相关信息后，程序即进行保护气体流量计算。对每种可选用的保护气体，程序分别计算出推荐的流量，并给出附加技术指导，比如告知是否应当采用气体透镜、推荐焊工帽上保护镜片的合适黑度等。计算中，系统将考虑焊接规范（焊接电流、喷嘴距离）、接头（材料、接头形式、焊接位置）、保护气体成分等影响流量的因素。

随后，程序将作经济性分析，即计算每米焊缝成本（考虑焊接工时及气体消耗量）。在对每种保护气体所允许的焊接速度作出评估后，程序即可算出每米焊缝的焊接时间。

最后，该程序按照总成本次序，列出可选的保护气体及其推荐流量。

3）MAGWIN－焊接工艺优化及焊接缺陷分析　德国ISF开发的MAGWIN是其DOS版软件MAGEXPERT的更新换代产品。适用于短路、喷射、脉冲等电弧类型的MAG焊。具有工艺制定、工艺优化和缺陷分析功能，各功能间紧密衔接，结合焊接试验，共同完成焊接工艺的优化设计任务。该软件结构上分四个部分：主控部分、数据库接口、回归分析模块及用户界面。开发中采用了模糊推理及面向对象的程序设计（OOP）技术。

首先，程序将在用户的参与下确定一套初步工艺。用户需进行焊接任务定义，并输入有关边界技术条件。如选择待焊母材及保护气体、选择坡口形式并确定坡口尺寸、选择焊接位置和焊枪姿态、确定焊接规范。程序还将给出电弧类型、焊接线能量、熔敷率、导电嘴距离等信息。软件提供了17种单一或混合的惰性或活性保护气体供选择。确定焊接规范时，程序以电流－电压－焊接速度三维立体图的形式显示不同电弧类型情况下所允许的焊接规范变化范围，用户可用鼠标在图中点取适宜的焊接规范，亦可直接键入具体数值。该三维图形是在数据库的基础上由程序生成的，对于焊接电流，还考虑了具体焊丝的承载能力、合金钢允许的冷却速度等因素。

然后，根据软件确定的工艺进行焊接试验。如果焊接结果并不满意但还未出现焊接缺陷，则可启用本软件的工艺优化功能，用户将试验结果告诉系统，比如从示意图中选择焊缝断面外观类型、描述飞溅情况等。试验中所采用的焊接规范也必须同时输入。程序随即进行推理，得出工艺改进方案。需要时，程序可给出工艺及接头准备方面的技术性提示。如果焊接试验中出现焊接缺陷，可启用其缺陷分析功能。程序能够对产生裂纹、几何偏差、未熔合、未焊透、夹渣、气孔等缺陷的原因进行分析，并给出具体措施。该软件的焊接参数数据库基于相关文献及ISF的焊接试验。

MAGWIN提供了较好的帮助功能，拥有丰富的图形帮助和输入时的敏感帮助。

4）通用型弧焊工艺专家系统QHWES－焊接工艺选择与工艺制定　通用型弧焊工艺专家系统QHWES由清华大学研制开发，1993年推出其DOS版产品，1996年完成其WINDOWS版本。该项研究得到国家自然科学基金支持。开发过程中灵活运用了模糊推理、默认推理、自然语言理解等技术，在知识获取方面，采用了统计分析及人工神经网络技术。在1994年国际焊接年会上，该软件曾引起同行专家的广为关注和好评。现已在化工机械制造、石化设备安装与检修、铁路机车制造、工程机械制造、重型机械制造、钢铁冶金等领域获得应用。

该软件适用于一般电弧焊接。其主要功能包括产品焊接工艺编制、焊接工艺设计、焊接工艺管理、知识库维护、焊接工艺相关知识咨询、焊材用量及成本计算。

系统具有良好的通用性和实用性，其突出特点是提供了较强的知识获取接口，用户不仅能够处理常规知识（如焊接规范参数设计知识），而且能够处理与推理过程的控制相关的知识（如对焊接工艺进行优选的知识），软件的整个推理体系也十分灵活。因此该系统已具备了骨架系统特点，为用

户提供了较强的再开发能力，使系统具有良好的适应性。此外，系统能够完整解释其推理过程。

5）焊接工艺数据库及专家系统－焊接工艺制定　哈尔滨工业大学与哈尔滨锅炉厂联合于 1991 年研制完成，已在哈尔滨锅炉厂等企业得到应用。并于 1996 年推出其 WINDOWS 版本。

该软件适用于锅炉压力容器焊接，能够为合金钢、耐热钢、不锈钢和铝合金设计焊接工艺。主要功能包括焊接工艺评定报告（PQR）数据库管理、工艺规程数据库管理、工艺设计专家系统。

PQR 数据库管理系统除进行一般数据管理外，还具有工艺评定必要性判断功能。用户输入欲进行评定焊接工艺的有关参数，程序可根据工艺评定标准，自动判断数据库中是否已经有能够覆盖该工艺的 PQR。进入“焊接工艺设计专家系统”后，用户首先输入母材牌号、厚度、接头形式等数据，程序随后即依据其知识库进行推理，得到一份完整的焊接工艺。用户可据此进行工艺评定试验。

该软件还包含一个“焊接接头机械性能预测”模块，能够对 20、20 g、16MnR、19Mn6 等钢材预测其在指定焊接条件下的焊缝金属及焊接热影响区的力学性能。

3.2.2　焊接过程实时控制类专家系统

焊接过程实时控制是焊接专家系统的重要发展方向（表 7.2-10），但目前已开发的系统不多，有待进一步拓展。典型系统如美国焊接研究所（AWI）与美国国家标准技术研究所（NIST）联合研制的 Weldexcell 及美国通用数字公司的 NEWCS 等。

Weldexcell－焊接工艺制定与实时监控系统适用于船舶业的机器人焊接。该项研究得到美国海军制造技术计划资助，于 1992 年完成。该软件分离线工艺制定和在线工艺监控两部分功能。在离线状态下，可完成焊接工艺规划，包括绘制焊缝符号、进行焊接接头设计、选择焊接材料、计算预热温度、编制焊接工艺指导书 WPS。此时程序将向用户询问材料类型、焊件厚度等一系列信息，生成的工艺将被直接送往车间的机器人焊接控制器。焊接时，控制器借助于多种传感器监测机器人焊接参数，并依据已制定的焊接工艺，调节参数偏差。该系统具有多种传感信息并行处理的特点。

NEWCS 用于军舰小批量自动焊，分焊前、焊接过程及焊后三部分功能，焊前完成接头设计、焊接方法选择、材料选择、工艺制定等任务，焊接中通过传感器监控焊接工艺的执行，焊后进行故障诊断及焊缝检查分析。

这两个软件虽然已将离线工艺设计与在线实时控制相结合，但就其内容而言，只是按已经拟定的工艺对工艺参数进行控制，还不是一种真正意义上的实时专家系统。比较起来，美国 Adaptive Technologies 公司的 Camtech 1000 和 Adaptitech 1000 则具有真正的实时性。该专家系统可完成零件定位、焊接操作、质量检查等功能。焊接过程中，系统根据来自传感器的光、温度、电弧等信息，自动调整焊接路径、线能量、送丝速度、摆动参数等，并可优化多道焊参数。

另外，日本 NKK 公司的 Expert System for Control of Welding Parameters 可给出最优焊接参数，进而控制焊接设备，以保持恒定的熔深及焊道高度。

3.2.3　焊接裂纹预测与缺陷诊断类专家系统

焊接裂纹预测与缺陷诊断类专家系统与 MYCIN 等经典的诊断型专家系统比较相近，有许多成熟的技术可资借鉴。开发此类系统的困难在于有关的专家知识具有很强的经验性，复杂而难以获取。此外，工程问题往往需要一些非常规的知识表示及处理方法。

这类焊接专家系统可用于诊断焊接缺陷类型、缺陷致因，或进行具体焊接工艺条件下的缺陷预测（如表 7.2-11 所示）。最具代表性的是英国 TWI 的裂纹诊断专家系统 Weldcrack Expert 和美国 Stone & Webster 工程公司开发的 Weld Defect Diagnosis Expert System。

表 7.2-10　焊接过程实时控制类专家系统

名　　称	功能（类型）	开发（提供）者
NEWCS	工艺制定，实时监控、诊断	General Digital Industries（美）
Camtech 1000 and Adaptitech 1000	实时监控与诊断	Adaptive Technologies（美）
Weldexcell	工艺制定、实时监控	AWI & NIST（美）
Expert System for Control of Welding Parameters	实时监控	NKK Corporation（日）

表 7.2-11　焊接裂纹预测与缺陷诊断类专家系统

名　　称	功能（类型）	开　发　者	备　注
Weldcrack Expert	裂纹诊断	TWI（英）	已商品化
Weld Defect Diagnosis Expert System	缺陷分析	Stone & Webster Eng.（美）	已商品化
Weld Defect	缺陷分析	MatWeld Soft（奥）	
Welding Defects Prediction	缺陷预测	Cranfield Inst. Of Tech.（英）	
Automatic Welding Identification System for radiograph Testing	缺陷识别	KAWASAKI Heavy Industries，Co. Ltd（日）	图像处理
Expert System for Judgement on Understand Cause of Weld Defects	缺陷分析	KAWASAKI Heavy Industries，Co. Ltd（日）	
Weld Defect Type Identification System	缺陷识别	KOMATSU，Co. Ltd（日）	超声波探伤
国产低合金高强钢焊接冷裂纹专家系统		天津大学	实用原型
焊接缺陷识别专家系统（WDR）	缺陷诊断	上海交通大学	
焊接冷裂纹的计算机辅助评定专家系统		上海交通大学	演示原型
焊接裂纹预测与诊断专家系统（WCPDES）	裂纹预测与诊断	天津大学	实用原型
激光焊缝质量诊断实时焊接专家系统	缺陷实时诊断	清华大学	实用原型
焊接缺陷诊断与咨询专家系统	缺陷诊断	甘肃工业大学	研究原型



续表 7.2-11

名　称	功能（类型）	开　发　者	备　注
焊接裂纹的计算机辅助评定系统		西安交通大学	研究原型
焊接缺陷及工艺问题分析、诊断专家系统	缺陷诊断	哈尔滨工业大学	演示原型

近两年，结合图像处理、人工神经元网络等先进技术，日本的某些公司在射线探伤和超声波探伤的缺陷识别方面已开发了相应的专家系统。我国天津大学、甘肃工业大学等也有较为深入的研究。

1）Weldcrack Expert－焊接裂纹类型诊断　该软件适用于铁素体钢的结晶裂纹、氢致裂纹、再热裂纹、液化裂纹和层状撕裂等裂纹类型。

启动该软件后，程序会提出一系列有关裂纹特征与位置以及焊接工艺、材料等方面的问题，在用户分别作出回答后，程序即依据其知识库进行推理，分析现存裂纹属于那一种类型。

Weldcrack Expert的知识库分为两级（图7.2-3）。刚进入系统时，程序会问是否有宏观/微观断面、断裂面是否已断开等问题，以决定咨询过程的详细程度。随后将基于其基本知识库进行提问，如发现裂纹了吗？裂纹位置在何处？裂纹走向如何？程序将根据用户的回答，对产生每种裂纹的可能性作出评估，然后对可能性最大的一种裂纹类型，启用其相应的二级知识库。如对于结晶裂纹会问：裂纹表面发蓝吗？处于二级知识库时，或者得出结论而结束推理过程，或因其他裂纹的置信度变成最大而切换至与该裂纹类型相应的二级推理。

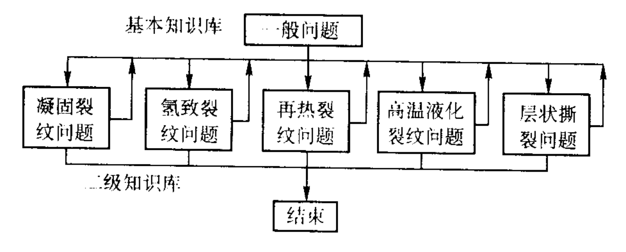


图7.2-3　Weldcrack Expert系统结构图

该软件将人机界面分为三部分：顶部显示每种裂纹类型的置信度值，右侧以直方图形式显示置信度变化，左侧为人机交互界面。屏幕上的置信度数据会随推理情况的变化做动态刷新。如果某种裂纹类型的置信度大于等于70%，程序即认为，可将该裂纹类型作为可靠的推理结论。

推理过程中，用户也可要求沿推理路径返回，以便更改已经作出的回答。诊断过程及结果可存入磁盘，建立诊断实例库，也可打印输出。

该软件以文本、图解及图像等形式，为用户提供了比较丰富的敏感帮助，比如包含30余幅典型裂纹的金相照片。如需要的话，用户亦可将推理过程限制于某特定裂纹类型。

2）Welding Defects Prediction－焊接缺陷预测专家系统　该软件由英国Cranfield技术研究所研制，适用于氢致裂纹的预测。可在采用某焊接工艺进行焊接时、预测产生氢致裂纹的可能性。该软件内含数据库，存有母材及焊材的成分、性能等。

用户首先输入有关焊接工艺数据，如电流、电压、焊接速度、送丝速度、母材厚度等。程序随即启用其分析模块，进行预热评估、热过程分析、组织性能变化分析、应力分析等，得到硬度、冷却速度、预热温度、层间温度、淬硬性、焊道宽度、熔深、塑性等指标。然后，程序将进入缺陷分析阶段，经推理得出最终诊断结果。其结论包括发生氢致裂纹的可能性、发生氢致裂纹的温度是否低于临界点、是否存在导致氢致裂纹的焊接应力等，推荐应采取的措施。

3.2.4　焊接结构安全（缺陷）评定类专家系统

焊接结构安全（缺陷）评定专家系统用于对有缺陷焊接结构的安全性进行分析和评估（表7.2-12）。

由清华大学于1992年完成研制开发的“有缺陷结构安全评定焊接专家系统”适用于有缺陷结构的断裂评估。该项研究得到国家自然科学基金支持。该软件以国际上最新的脆性断裂和塑性失稳双判据法评定规范——英国中央电力局（CEGB）的R6为主要基础，同时吸收了英国PD6493、日本JWES—2805K、我国CVDA—1984等评定规范的优点及相关知识，适合于从线弹性断裂到韧性撕裂的各种情况。该系统根据“合乎使用”的原则，对含缺陷结构进行不同层次的断裂与疲劳安全性分析及安全裕量敏感性分析。该软件适用于含缺陷金属结构的断裂评估。系统的功能结构见图7.2-4。

系统提供了两种处理方式：自动分析和用户参与下的详细分析。在自动分析方式下，用户只需输入与裂纹类型和尺寸、材料性能、承载情况等相关的一般基础数据，系统即可自动进行分析推理，判断含裂纹结构在“最有利”以及“最不利”的条件下是否安全。如在“最有利”的条件下是不安全的，或在“最不利”的条件下是安全的，则系统可得出结构是安全的或是不安全的确切结论。如介乎这两种情况之间，则程序将启用详细分析功能。

在详细分析方式下，要求用户具有一定的断裂安全评定知识，以便参与失效评定图选择、分析类别（启裂分析、简单韧性撕裂分析、详细韧性撕裂分析）选择等决策过程，同时还可能要提供更进一步的数据，如J积分断裂韧性试验数据等。

该软件还提供了多个国家和地区的压力容器及低温用钢的拉伸性能数据，能够由有关试验数据推算出材料性能指标。程序评定结果能够以评定报告的形式输出至屏幕或打印机。

3.2.5　焊接CAD类专家系统

这方面的焊接专家系统不多。美国CSM & AWI联合开发了一个焊接标准符号生成系统Weldsysmple，已达到商品化水平。该软件利用AutoCAD，可辅助创建符合AWS A2.4—86标准——“焊接、钎焊及无损检测标准符号”的机械制图用焊接符号。瑞典焊接研究所开发的SAFE系统可用于机械结构设计，完成强度、寿命、安全性等方面的计算分析。瑞士

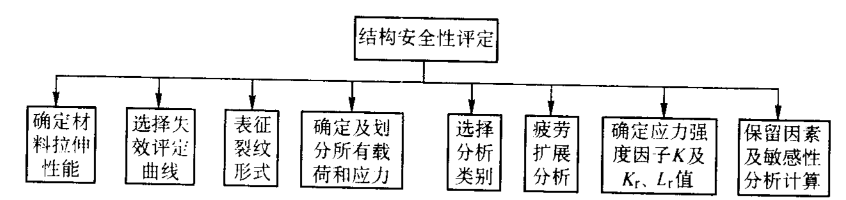


图7.2-4　“有缺陷结构安全评定专家系统”功能结构

EPFL 开发的 FRD 系统属于尤里卡计划 EU259 项目，该软件按欧洲 Eurocode 3 标准对结构进行分类，可完成有关疲劳计算，并可提出结构改进方案，提供结构改进后的疲劳评估（表 7.2-13）。

表 7.2-12　结构安全（缺陷）评定类焊接专家系统

名　　称	功能（类型）	开发者	备　　注
Crackwise	断裂评估	TWI（英）	BSI PD6493，已商品化
Fatiguewise	疲劳评估	TWI（英）	BSI PD6493，已商品化
有缺陷结构安全评定专家系统	断裂评估	清华大学	达实用水平
压力容器缺陷评定规范 CVDA—84 咨询专家系统	断裂评估	清华大学	达实用水平

表 7.2-13　焊接 CAD 类专家系统

名　　称	功能（类型）	开　发　者	备　　注
Weldsymple	焊接符号生成	CSM & AWI	已商品化，AWS A2.4—86
SAFE	CAD	IVF（瑞典）	机械结构设计
焊接变压器设计专家系统	结构 CAD	上海交通大学、吉林工业大学	实用原型
超声波焊接专家系统	结构 CAD	上海交通大学	研究原型
焊缝坡口设计与选择专家系统	接头 CAD	华中理工大学	研究原型
熔化焊焊接接头设计系统	接头 CAD	西安交通大学	研究原型

此外，我国上海交通大学与吉林工业大学合作开发的焊接变压器设计专家系统也基本达到实用水平，该软件可对 14 种系列的变压器及电抗器进行优化设计，使设计出的变压器性能价格比最优，并可对已有变压器作出评估。西安交通大学以 Windows 95 为操作系统，在 Visual C + + 4.0 开发环境下，采用了面向对象技术（OO）和专家系统（ES）技术相结合的方法，开发了一个 CAD 应用软件—— WJ - CAD for Windows 95/NT 系统，用于熔化焊焊接接头计算机辅助设计。该系统具有焊接接头的设计功能和接头图形绘制功能。GB 985—1988 和 GB 986—1988 中的内容已经全部实现，能够设计各种坡口形式的焊接接头，并且具有一定的知识库，用于指导设计，即具有一定的智能设计能力，具有丰富的焊接接头参数化数据库，绘图速度快，编辑功能强。

3.2.6　焊接设备故障诊断类专家系统

这方面的焊接专家系统比较少，一般用于特定的焊接设备。

美国 Miller 公司开发的 Miller Expert program，专为该公司生产的 Maxtron 300、Deltaweld 451 及 651 等产品服务。法国 Framatome 公司的 Hot - Wire TIG Expert System，用于热丝 TIG 堆焊设备，可分析 200 种故障致因，系统将这些故障致因分为电路、组件、部件族、部件等四个水平来处理。

3.2.7　标准解释系统

在介绍焊接应用软件的文献中，这类软件通常单列，不归入焊接专家系统的范畴。但在解释或执行有关焊接标准时，专家经验及知识常常不可或缺，而且有关标准内容在形式上与专家知识具有相似性。因此，英国 TWI 的 Lucas 在文献中指出，这类软件的开发以采用专家系统技术为佳。因此，本文将标准解释类软件作为焊接专家系统的一种特殊类型列出（表 7.2-14）。

表 7.2-14　标准解释系统

名　　称	功能（类型）	开发（提供）者	备　　注
Turbo IX	标准解释	C - spec（美）	已商品化，ASME IX
Weldspec Check	标准解释	TWI（英）	已商品化，EN288，ASME IX
Preheat Plus	标准解释	Edsion Welding Inst.（美）	已商品化，AWS D1.1
Fatiguecalc	标准解释	TWI（英）	已商品化，BS5400
Euroweld for WINDOWS	标准解释	TUV Rheinland（德）	已商品化，EN287，EN288，HP3
QM Rostock	标准解释	SLV - 1 Mecklenburg - Vorpommen（德）	已商品化，ISO9000
QCWELD ELS	标准解释	4X Software as（挪威）	EN729，EN287
Preheat	标准解释	TWI（英）	已商品化，BS5135

现有此类软件涉及与焊接工艺、焊工、焊接工程项目管理以及焊接结构设计相关的多类焊接标准，可解释标准内涵、检查有关内容是否符合标准、执行标准规定、或按标准进行管理。典型的标准解释类软件如美国 C - Spec 公司的 Turbo IX、英国 TWI 的 Preheat 和 Fatiguecalc。

Turbo IX 是美国 C - Spec 公司研制的焊接工艺评定标准解释系统。该软件适用于 ASME IX 焊接工艺评定标准。用于解释及执行美国锅炉及压力容器规范中 ASME IX 焊接工艺评定标准，具体功能包括：数据检索、数据维护，根据用户输入信息及 ASME IX 规则进行逻辑决策。借助该软件，用户可方便地查阅 ASME IX 各变量的相关规定，查询母材及填充金属的分类号，计算工艺评定的厚度适用范围，确定工艺评定所需要的力学性能试验。

该软件的数据库包括：ASME IX 中关于各变量的规定，



对标准内容的解释，ASME Ⅸ所列母材，ASME Ⅸ Part C及AWS A5.1—A5.31所列填充金属。系统采取菜单驱动方式，并提供敏感帮助。

3.2.8 其他类型焊接专家系统

除上述类型外，专家系统技术在设备配置、数控切割、焊接冶金分析、焊工考试、焊接定额及成本分析等方面也得到了一定的应用（表7.2-15）。在焊接冶金分析方面，除表7.2-15所列软件外，国内甘肃工业大学和清华大学也研制过基于焊接CCT图的、具有较强功能的软件。对于焊接成本估计类专家系统，有代表性的主要有英国焊接研究所的Weldcost，美国爱迪生焊接研究所的用于估算各种接头和焊接方法的填充金属和焊接时间的系统Weldbest等。

1）CaB Configuration Support Program－焊接设备配置　瑞典ESAB公司研制。适用于ESAB公司焊接成套设备产品。该软件可根据不同用户需求，对该公司焊接成套设备产品进行完整的配置设计，涉及基本参数（基本部件类型、操作机立柱与悬臂尺寸、机头位置、工艺数据）、立柱与悬臂参数（基础类型、工作区域、附件）、机头参数（当有多个机头时）、焊剂操作系统、保护气设备、焊丝操纵系统、电源、总控制系统等内容。

2）Optinest－数控切割设备自动套料　美国Optimation公司研制，适合于火焰、等离子、激光、高压水及其他仿形数控切割。

该软件采用成本驱动方式，可在同一张材料板上实现不同形状零件的套料。此外，还可规划套料步骤，驱动及控制套料设备，并允许手工处理设计结果。

表7.2-15　其他类型的焊接专家系统

名　称	功能（类型）	开发（提供）者	备　注
SINFO 1	冶金分析	Prof. Hermann Thier（德）	已商品化
Expert System for Predicting Continuous Cooling Transformation in Steels	冶金分析	Univ. Regina（加）	用G2开发
CaB Configuration Support Program	设备配置	ESAB（瑞典）	
Factory Plan	装备优化布置	TWI（英）	已商品化
Optinest System	自动套料	Optimation Inc.（美）	
Welder Qualification Test Selection Expert System	考试项目选择	Stone & Webster Eng.（美）	已商品化
Weld Estimating Expert System	成本分析	Stone & Webster Eng.（美）	已商品化

上述资料表明，焊接专家系统已取得可喜成果，具有广阔的发展应用前景。与此同时，由于焊接专家系统的发展历史较短，已开发的系统在技术上也不可避免地存在一些问题。比如，机器学习功能较为薄弱，大多数系统都不具备推理解释能力。许多系统因采用了普通的专家系统开发工具，往往不能全面反映焊接领域特点，难以实现某些特殊要求及功能。一些系统拘泥于传统的专家系统技术，没有结合领域特点有所发展或创新，也没有灵活运用各种新技术，特别是一些复杂系统，限制了软件的实用性。这些问题都有待于焊接工作者在未来的焊接专家系统研究实践中去解决。

3.3 焊接专家系统的发展趋势

模糊技术、神经元网络技术和面向对象等人工智能新技术的迅速崛起为专家系统注入了新的活力。随着网络技术和多媒体技术的迅速发展，对专家系统智能化的要求也越来越高。根据焊接专家系统、信息与人工智能技术的现状与动态，焊接专家系统的发展趋势可概括为如下几个方面。

1）现有应用研究的加强及新的应用领域的拓展　从制造业计算机应用的总体趋势看，智能制造系统将成为本世纪制造业的主导，将从设计、制造、经营到管理的全过程采用人工智能技术，焊接生产也不例外，这为焊接专家系统的发展提供了有利背景，专家系统将会在焊接领域的各个方面发挥其不可替代的重要作用。

然而，目前的焊接专家系统产品数量远不能满足实际需求，质量上也有待完善。例如，有关焊接CAD、焊接过程控制、设备故障诊断等方面的专家系统的研究仍比较薄弱，即使在焊接工艺方面，也需要进一步拓展和深化。现有焊接工艺选择与制定专家系统几乎均限于焊接工艺本身，在整个制造工艺过程设计（CAPP）方面仍未投入多少力量。近几年，清华大学同太原重型机器厂、徐州工程机械厂等单位合作，在焊接CAPP方面开展了研究，并就CAPP专家系统技术进行了探索。对生产设备的智能控制是智能制造系统的基础，与设备控制有关的内嵌式专家系统软件被直接嵌入具体设备的控制系统，又称专家控制器，这将是未来复杂设备实现智能控制的主要形式。据文献介绍，已有内置式焊接监控与诊断专家系统方面的研究。专家系统在焊接生产规划、资源配置、生产调度、焊接质量控制等方面也将有广泛的应用前景，已有人在研制在线焊接质量控制与统计方面的专家系统。专家系统技术对于教育培训、焊接材料采购咨询等软件的开发亦具有重要价值。

2）人工智能新技术在焊接专家系统中的应用研究及开发技术的提高　随着焊接专家系统的发展及新的实际问题的提出，对人工智能新技术的应用研究将进一步引起重视。即除灵活运用传统的知识获取方法、知识表示方法、知识推理技术等专家系统技术，完善和提高系统解释能力、知识获取与机器学习能力、推理控制能力、人机界面的友善性等性能外，在问题描述模型、问题求解方法、程序设计方法、软件实现技术等方面将不断引进人工神经元网络（ANN）技术、不精确推理特别是模糊推理技术、面向对象方法、遗传算法等人工智能新技术，进行模型、方法和技术的集成，设计和建造集成化、混合型专家系统（如模糊专家系统、神经网络专家系统等）。

神经元网络和专家系统分别代表着人工智能中两种截然不同的研究方法与方向，即结构主义与功能主义，二者各有特点，且互为补充。神经元网络具有从大量不完全、非精确或模糊的经验数据中抽取专家知识的能力，而焊接专家在以往各类焊接工程设计经历中，已经形成一个以工程特性—系统结构为模式的设计知识空间。如进行新的工程设计时利用神经元网络得出一个设计的可行域，然后进行方案优选及设计，同时进一步充实设计空间的内容，这无疑为焊接专家系统的知识获取开拓了新的思维方式，即系统的外延性。在二者的结合上，神经元网络专家系统利用神经元网络的自学习、自适应、分布存储、联想记忆、并行处理以及鲁棒性和容错性强等一系列特点来实现专家系统的功能模块。目前的主要形式有：基于神经元网络的专家系统（又称联结主义专家系统），神经元网络与专家系统的组合系统，基于知识的



神经网络（又称专家网络）。

模糊专家系统的主要特点是通过模糊推理解决问题。这种系统善于解决那些含有模糊性数据、信息或知识的复杂问题，也可以通过把精确信息或数据模糊化，然后通过模糊推理解决一些复杂问题。模糊技术与神经网络存在某种等价和互补关系，于是人们就将二者结合起来，构造模糊－神经系统或神经－模糊系统，从而开辟了将模糊技术和神经网络技术相结合、将模糊系统和神经网络系统相融合的新方向。

从焊接工程特点分析，未来的焊接专家系统应更多地具备对不同层次知识的处理功能，不仅能够利用经验、常识等符号化的表层知识，而且能够充分利用各类深层次的专业理论知识，把专家知识和领域知识有机融合，以增强系统解决问题的智能化水平，使其更接近于专家能力。例如对于一个焊接设备故障诊断专家系统，如果不仅有专家的经验知识，而且也有设备本身的原理性知识，那么，对于故障判断的准确性将会进一步提高。

3）充分利用网络技术实现焊接专家系统的分布式处理和协同工作　进入20世纪90年代后，计算机网络技术取得了突破性进展，使得各种信息技术的广泛共享成为现实，从而为各类软件提供了优良的使用环境和生存空间。就焊接专家系统而言，通过联网，可以利用某些大型数据库资源，系统也可提供多用户能力，实现系统共享。但现有焊接专家系统基本上都是独立使用的软件，功能单一，只侧重于解决某个特定范围的问题，而未来的系统将向集成化方向发展，对于涉及较多领域知识的、比较复杂的问题，可由多个专家系统协同处理。

分布式专家系统和协同式专家系统是网络时代专家系统的重要特征，与此相关的计算机技术是并行处理技术和专家系统集成技术。分布式专家系统的构成是把知识库和（或）推理机分布在网络上，从而把一个专家系统的功能经分解后均衡地分布到各个处理机上并使它们并行工作，进而在总体上提高系统的处理效率。协同式专家系统也即群专家系统是克服单一功能专家系统局限性的一个重要途径，它能综合利用若干专家系统相互协作，共同解决焊接领域的综合性问题。协同式专家系统和分布式专家系统有一定的共性，它们都会涉及多个分专家系统。但分布式强调的是处理的分布和知识的分布，它要求系统必须在多个处理机上运行；而协同式强调的是分系统之间的协同合作，各分系统也可以在同一处理机上运行。

4）数据库技术与焊接专家系统结合实现数据共享　数据库技术与焊接专家系统的结合包括大型焊接数据库的建立和利用以及采用数据库技术来管理焊接专家系统的知识库。充分利用焊接数据库，研究以当前获得快速发展的焊接数据库作为知识源的自动知识获取机制是各种焊接工程专家系统值得重视的研究方向。伴随着网络化的发展，各种数据、标准等的一体化和统一化进程加快，焊接领域的各种标准将进一步得到统一。从前那种重复开发、各有标准、各自建立特定数据库的做法必将改变，其发展方向是建立共享性的统一数据库，焊接专家系统通过提供与外部数据库的接口，可有效增强系统处理能力，提高系统的开放性，从而使焊接专家系统的开发发生巨大的变化。同时，开放性也是实现专家系统集成的前提。

5）利用多媒体技术实现焊接专家系统人机接口的智能化和拟人化　多媒体技术因其具有生动的图、文、声效果和强大的感染力等而有着广阔的发展空间。但目前由于其巨大的工作量而仅限于在培训、销售环节的焊接软件中应用。随着计算机软硬件环境的进一步发展，多媒体技术会方便地应用到焊接专家系统中。通过把多媒体技术引入焊接专家系统的人机界面，使其具有多媒体信息处理功能，可以有效地改善人机交互方式，增强专家系统的拟人性效果。

6）研制具有通用性的焊接专家系统及焊接专家系统开发工具　开发具有良好通用性、适应性的焊接专家系统，可促进其推广应用，避免重复投入，大大提高开发效益。像欧洲尤里卡计划EU259，组织同领域权威机构联合开发，这可能是保证系统推广能力的最佳方式。另外研制具有焊接领域特点的开发工具，比如焊接专家系统的骨架系统，也是提高系统开发速度与质量、促进专家系统应用的途径之一。但骨架系统的开发难度会更大一些。

随着人工神经网络、多媒体、模糊数学等先进技术的引入以及软件开发工具本身的迅速发展，专家系统的应用预计将迈上一个新的台阶。就焊接领域来说，一方面应当开发出更多的具有良好通用性、适应性的产品，另一方面，随着焊接工作者对专家系统技术的深入了解和掌握，可以有更多的人投入到焊接专家系统研究中来，开发出一些适合特殊要求的专用系统。

英国焊接研究所的Lucas在文献中预言：专家系统将在下一代焊接应用软件中扮演重要角色。实际上，应当把专家系统当成一门技术来利用，而不是仅仅当成一种软件类型。在各类软件的开发过程中，凡是遇到较为复杂的、需要借助专家经验与专家知识来解决的问题，均可考虑采用专家系统技术。这样开发出来的软件系统可以广义地被称为基于知识的系统，其主要部分可以是专家系统，也可以是其他类型的系统，比如事务管理系统或小型的设备控制软件等。因此，只要焊接应用软件中涉及到专家知识，专家系统技术就有其用武之地。可以预见，焊接专家系统将获得持续不断的发展，并在焊接工程及科研工作中发挥重要作用。

4　焊接专家系统开发技术及其实例

4.1　焊接专家系统的开发与评价方法

4.1.1　焊接专家系统开发策略

计算机软件系统的开发可采取多种开发策略，又称开发模型。所谓开发模型是指，按照什么样的宏观模式来组织并开展软件系统的开发。传统的软件开发多采用瀑布模型，即一次性完成总体及程序设计。随着软件开发经验的积累及软件复杂程度的提高，人们认识到，瀑布模型并不能从本质上反映软件开发过程本身的规律。于是，有人提出了速成原型模型、增量式模型和螺旋式模型等。

焊接专家系统是一种智能化的复杂软件系统，尤其是大型焊接专家系统，知识获取困难，系统设计复杂，一个实用系统的产生往往要经过多次反复、逐步提高。因此焊接专家系统的开发一般不宜采用瀑布模型。图7.2-5为建造焊接专家系统的一般步骤。由该图可知，一个性能良好的焊接专家系统的完成须经过由问题认识、系统设计、系统实现到系统测试的多次反复。

在具体组织开发工作之前，要确定合适的任务及目标。首先，所选择的焊接领域问题应具有恰当的难度，太难则不易获得成功，太容易了又没有开发价值。问题不能太笼统，不可选择那些连焊接专家都说不清甚至解决不了的问题。其次，预期成果应具有实际需求，使用后才能获得效益。

焊接专家系统开发人员的选择也是至关重要的环节。由于专家系统的特殊性，并非任何有经验的计算机程序员及焊接领域专家都能胜任此类工作。一方面，负责开发任务的知识工程师应具备足够的专家系统理论及开发基础。当然，由于所选择的开发工具的不同，对知识工程师的这方面要求会有所差异。另一方面，焊接领域专家应具备丰富的关于待处理焊接领域问题的经验，并具有足够的表达能力、良好的合



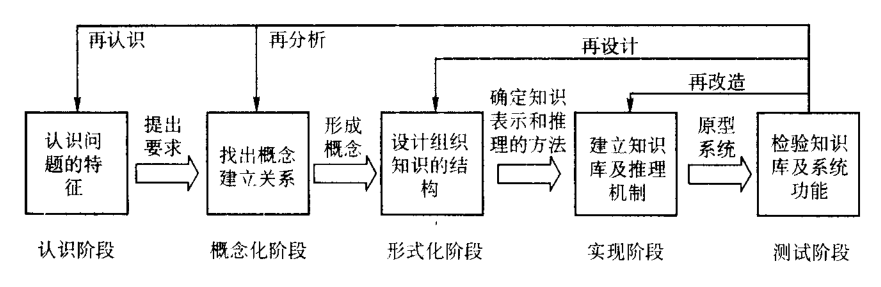


图 7.2-5　建造焊接专家系统的一般步骤

作态度，能够在时间上得到保证，且应对计算机有一定了解。

确定了待处理焊接领域问题后，以下几方面应在开发过程中予以考虑和重视。

1）用户需求　这是确定系统开发目标的依据。一方面应弄清用户需要从焊接专家系统得到哪些信息、解决哪些问题，另一方面也要注意待开发焊接专家系统所能达到的能力、开发人员对焊接领域问题的熟悉程度、开发时间是否充分等，并需在二者间做适当权衡。

2）功能定位　确定待开发焊接专家系统是面向普通使用者、起指导作用，还是面向具有一定焊接领域知识与经验的用户、起辅助工具作用。不同的功能定位，对系统目标要求会有较大差异。

3）领域知识评估　需弄清问题领域的知识类型与知识量。可通过绘制决策树来进行领域知识分析。此外，应了解是否有图形方面的需求（如焊接坡口），是否需借助外部程序或数据库来实现系统功能，领域知识是否具有不确定性等。领域知识的正确评估，是确定知识表达方法的基础。

4）知识获取方法　通常较为可行的方式是，由知识工程师提出具体问题实例，再请焊接领域专家予以解决，最后由知识工程师分析解答过程及结果，得出有关知识与推理方法。最理想的情况是，知识工程师与焊接领域专家这两种角色合二为一，从而消除知识获取的障碍。

5）相关的信息系统环境　比如，待开发焊接专家系统是否将与其他计算机应用系统集成，集成方式如何，要求集成到什么程度。

4.1.2　专家系统开发工具和环境

建造焊接专家系统时，首要的问题是如何选择合适的的开发工具和环境。它关系到焊接专家系统的开发效率及未来系统能够达到的性能水平。综合起来，专家系统开发工具可分为六种类型（图 7.2-6)。其中，骨架系统是一类面向最终用户的开发工具，其余工具的使用者主要是知识工程师。

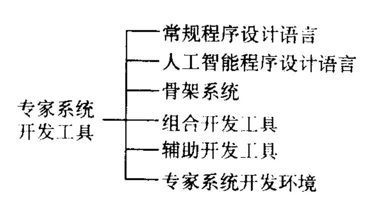


图 7.2-6　专家系统开发工具分类

1）常规程序设计语言　如 Visual C + +、Visual Basic、Visual C#、Delphi 或 Visual Age 等，又称面向问题的语言。这类语言灵活性、适应性好，但符号处理能力弱，如用于焊接专家系统，则要求开发人员具有很强的人工智能理论基础及独立构建推理机的能力。由于此类程序设计语言近年来发展迅速，功能日益完善，而人工智能程序设计语言版本更新缓慢，难于适应新的计算机软硬件环境，因此，普通程序设计语言已在焊接专家系统的开发中得到广泛的应用，有取代人工智能程序设计语言的趋势。

2）人工智能程序设计语言　人工智能程序设计语言是专门为人工智能应用而设计的计算机语言，如 LISP、Prolog、OPS5 等。这类语言以符号处理为特征，具有优良的内部推理机制。采用人工智能语言建造焊接专家系统时，开发人员需自行设计合适的知识表达形式，构造基于内部推理机制的推理机，建立人机接口及其他辅助设施。典型的人工智能程序设计语言有三类：以 LISP 为代表的函数型语言，以 Prolog 为代表的逻辑语言和以 Smalltalk 为代表的面向对象的语言。目前较多采用 LISP 和 Prolog 语言，但采用面向对象的程序设计方法是当前的一个趋势。

① LISP 语言　LISP 语言（list procssing language）于 1958 年由美国麻省理工学院的 J. McCarthy 提出。常见版本如 MacLISP、InterLISP、CommonLISP、GCLISP 等，其中 CommonLISP 被作为 LISP 语言的标准版本。

LISP 语言是函数型语言，它的一切功能都由函数来实现。因此，执行 LISP 程序主要就是执行一个函数，这个函数再调用其他函数。用 LISP 语言进行程序设计就是定义函数，LISP 语言的函数和数据具有统一的表达形式，即 S 表达式（Symbolic expression)，这给程序设计带来很大方便。LISP 语言的主要控制结构是递归，即函数的自我调用。递归的使用，使程序设计简单易懂。

② 逻辑程序设计语言 Prolog　Prolog（programming in logic）语言是人工智能与专家系统领域著名的逻辑型程序设计语言，其理论基础是一阶谓词逻辑。与常规的过程型程序设计语言不同，Prolog 的重点在于对象间的逻辑描述，因此又称为描述性语言。采用 Prolog 编写的程序是由说明程序应达到目标的逻辑说明组成的，程序员只需说明达到程序目标的逻辑方法，而不必说明程序执行的步骤，因而也有人把 Prolog 称为面向目标的语言。程序运行时能自动地适应模式匹配、回溯和递归。Prolog 语言很接近自然语言、文法简捷、逻辑性强、易学易用，用它编程简洁明了，可读性强。

Prolog 语言的第一个系统由法国马赛大学于 1972 年推出，最初用于编制自然语言的翻译程序，然后很快在欧洲成为人工智能的主导语言。1982 年曾被日本采纳，作为第五代计算机的核心语言。目前已广泛应用于关系数据库、抽象问题求解、数理逻辑、符号处理、定理证明、自然语言理解、专家系统以及人工智能的许多领域。国内流行的 Prolog 语言有多种版本，最常用的是美国 Borland International 公司为 IBM PC 及其兼容机研制的编译型 Prolog 系统，其早期版本取名为 TURBO Prolog，升级版本则更名为 PDC Prolog，已能支持 WINDOWS 平台。

Prolog 开发中心（PDC）最新推出的版本是可视化集成开发环境 Visual Prolog，是完全基于 Windows 环境的智能化编程工具。目前，Visual Prolog 在美国、欧共体、日本、加拿大、澳大利亚等发达国家和地区十分流行，是国际上研究和开发智能化应用的主流工具之一。预计短时期内也会在我国



广泛流行开来，并将迅速成为我国研究和开发智能化应用的最重要的工具。

Visual Prolog 具有模式匹配、递归、回溯、对象机制、事实数据库和谓词库等强大功能。包含构建大型应用程序所需要的特性：图形开发环境、编译器、连接器和调试器，支持模块化和面向对象程序设计，支持系统级编程、文件操作、字符串处理、位级运算、算术与逻辑运算，以及与其他编程语言的接口。Visual Prolog 还包含一个大型库，捆绑了范围广阔的 API 函数：包括 Windows GUI 函数族、ODBC/OCI 数据库函数族和 Internet 函数族（socket、ftp、http、cgi 等）。这个开发环境全部使用 Visual Prolog 语言写成，而且包含对话框、菜单、工具栏等若干编码专家和图形编辑器，支持 Windows 3.x/95/98/Me/NT/2000/XP、OS/2 和文本方式下的 DOS、Linux 和 SCO UNIX。

Visual Prolog 非常适合于专家系统、规划和其他人工智能（AI）相关问题的求解，是智能程序设计语言中具有代表性且应用较多的一种语言。Visual Prolog 不仅是优秀的智能化应用开发工具，而且已经成为适用于任何应用领域的强有力的通用开发工具。Visual Prolog 与 SQL 数据库系统、Visual C++或其它 C++开发系统、及 Visual Basic、Delphi 或 Visual Age 等编程语言一样，可以用来轻松地开发各种应用，包括数据库和 Web 应用。

3）骨架系统　骨架系统通常是在已获成功的具体专家系统的基础上，抽出其特定领域的专家知识，保留具有通用性的知识表示框架、推理机制及支持工具，经过适当改造后而形成，如 EMYCIN（Empty MYCIN）及其更新版本 S.1、M.1（微机版）等。骨架系统保留了原专家系统的基本结构，开发者只要按所提供的知识表示形式，将另一领域的专门知识填入骨架系统，并对有关方面做适当调整或选择，即可产生一新的专家系统。这大大缩短了专家系统的研制周期。但是，许多骨架系统在表达复杂知识及灵活控制推理过程等方面存在较大的局限性。

4）组合开发工具　组合开发工具与骨架系统合称知识工程语言。这类工具为用户提供多种可选知识表达方法及推理机制，能够处理不同领域和不同种类的问题。在数据存取和搜索方面，组合开发工具比骨架系统能提供更多的控制，但使用起来比较困难。如 Intellicorp 公司研制的 KEE，有框架、产生式规则、面向过程和面向对象等知识表达方法，采用多重知识库，规则解释程序可采取正向或反向链接。

5）辅助开发工具　包括能协助获取及表达领域知识的程序（如 TEIRESIAS）和设计正在建立的专家系统结构的程序（如斯坦福大学研制的 AGE—Attempt to Generalize）。这类工具多数仍未达到实用水平。

6）专家系统开发环境　专家系统开发环境除具备上述知识工程语言的功能外，还提供辅助编程的调试工具、知识库编辑工具，以及旨在提高系统性能的输入输出工具、推理解释工具等。目前，具备所有这些功能的专家系统开发环境仍较为少见。

一般而言，开发工具的通用性、灵活性越好，使用该工具构造专家系统所需的时间也就越长。选择何种开发工具，须根据焊接领域应用特点、系统目标、开发人员计算机基础、开发时间及成本要求等综合考虑。此外，适合特定领域应用要求的专家系统开发工具的研制，也是提高专家系统开发效率和质量的重要途径。

除上述分类方法外，开发工具按其实现技术又可分为基于规则的工具、基于框架的工具、基于归纳的工具、基于混合知识表示的工具等。

4.1.3 专家系统评价方法和内容

专家系统的评价是贯穿于专家系统整个建造过程的一项重要工作。对专家系统进行评价有以下几种基本方法。

1）轶事法　简单地启发式地使用一些例子来检测系统的工作情况，以评价系统的性能。

2）实验法　通过规定某种严格的实验过程，把系统产生的解释与相应事例的实际解释进行比较，进而评价系统在处理数据库中的各种问题事例时的性能。这种评价方法比轶事法全面、优越，但在具体实现方面和获得有代表性的事例方面常常会遇到一些严重的困难。

3）计算机与人分隔测试评价法　让被测试的专家系统和被测试的人分别求解同一个问题，然后由评价者对两者的求解结果进行评判，通过比较对专家系统求解问题的能力进行评价。其评价步骤包括准备测试集、领域专家和专家系统分隔解题、制定评价指标、评价委员会根据评价指标客观比较、用户评价报告等。

4）层次分析评价法　采用相对重要性加权的方法对专家系统进行多层次多指标的综合评价。其具体步骤为明确评价的目的、与领域专家协商确定系统目标及系统评价的指标体系、将系统目标分解成层次结构、逐层逐项进行测试比较、专家根据结构中每层各项元素的相对重要性给出加权系数、由顶向下逐层计算所有元素相对于总目标的权重、根据比较方案的总权重作出最终评判。

对专家系统的具体评价内容主要体现在如下三个方面：

1）正确性评价　由知识工程师和领域专家共同进行，包括系统设计、测试和运行结果的正确性。

2）实用性评价　由一般用户和专业用户进行评价，重点是评价专家系统的运行性能。包括有用性、可用性、透明性、灵活性、可靠性、经济性等。

3）先进性评价　主要由知识工程师进行，重点是评价系统的功能、实现技术及系统的意义。

上述专家系统评价内容的三个方面并不是孤立的，而是相辅相成的。由于专家系统的复杂性，在对其进行评价时应避免采用某种单一的指标。此外，在专家系统开发和使用的不同阶段，对专家系统进行评价的侧重也有所不同。根据以上评价内容，焊接专家系统可分为五个级别：

① 演示原型　能够解决部分焊接领域问题，旨在说明焊接专家系统技术的可用性。

② 研究原型　能够解决特定焊接领域问题。

③ 实用原型　已在用户环境下接受了大范围的测试并显示了足够的可靠性和良好性能。

④ 产品模型　在性能、求解问题的效率、灵活性、透明性等方面达到了比较令人满意的程度。

⑤ 商品化系统　已投入日常运行或已投放市场。

4.2 压力容器焊接工艺专家系统

在锅炉、压力容器、石油管道、船舶、核电等重要金属结构的焊接生产制造中，焊接工艺必须根据相应的标准或规范进行严格的工艺评定，形成焊接工艺评定报告 PQR，并在此基础上生成焊接工艺指导书 WPS，然后依据相应的标准制定焊接工艺规程，以保证产品的焊接质量和性能。如果在制定焊接工艺规程之前，没有进行过焊接工艺评定，工艺人员就要根据相关标准和经验提出焊接工艺评定委托书 PPQR。可见，制定一套焊接工艺规程文件要求严格，且过程繁琐，因此开发能够在对 PQR 和 WPS 数据库进行有效管理的基础上编制、检索焊接工艺规程文件的应用软件系统十分必要，它能够有效地利用现有 PQR 和 WPS，避免重复进行焊接工艺评定试验，节约资金投入，并且保证了焊接工艺规程制定的规范性和准确性，提高了焊接生产的效率。

然而，焊接工艺评定标准种类繁多，如美国的 ASME IX、AWS D1.1、API，欧洲的 EN287/288 等，我国则有



JB4708（钢制压力容器焊接工艺评定）、JB4420（锅炉焊接工艺评定）、JB6963（钢制件熔化焊接工艺评定）等，不仅各国不一样，而且各行业也不相同。同时，这类软件既要严格符合有关标准的各项规定，有时还要增加企业自己的一些特殊要求，因此很难编制一个通用的弧焊工艺规程制定系统。考虑到对不同标准或规范以及不同用户的适应性，有的软件为用户提供了一些工具，使用户可以自行修改其中的某些要求，或者直接为用户提供适合特定标准或规范的软件。由于这类软件把相关标准中的规定和要求嵌入在程序中，在软件中包含有知识库和推理机，软件系统具有一定的"智能"功能，所以国内也把这种软件称为"弧焊工艺专家系统"。

本节以清华大学研究开发的"压力容器焊接工艺专家系统 WEMS"为例，介绍焊接专家系统的开发过程和技术。该软件以压力容器制造为典型应用背景，在实现对 PQR、WPS 等工艺文件进行编制、检索、管理的基础上，根据"钢制压力容器焊接工艺评定标准 JB4708—2000"由 WPS 推理生成焊接接头工艺卡以及对焊接材料消耗的计算和汇总，最终生成指导焊接生产的焊接工艺规程。

4.2.1　功能需求

产品焊接工艺规程是锅炉、压力容器焊接生产所必须的技术指导性文件，主要包括焊接接头表、焊接工艺卡、焊材汇总表等。对于重要焊接件，每一个焊接接头都必须有各自对应的焊接工艺卡。在编制焊接工艺卡的过程中，工艺人员须查阅本单位已有的 PQR 或 WPS 档案，根据相关工艺标准（如"钢制压力容器焊接工艺评定标准 JB4708—2000"），判断每一 PQR 或 WPS 对当前焊接情况的适用性。当找到一份可用的 PQR 或 WPS 后，针对当前焊接条件，根据经验及有关规定，调节、补充某些工艺数据，形成最终的焊接工艺卡。当产品品种繁杂，PQR 或 WPS 资料较多，需要编制大量焊接工艺卡时，焊接工艺准备工作就变得异常繁琐、费时，更谈不上当存在多份可用 PQR 时进行优选的问题。编制产品焊接工艺规程时，工艺人员的另一项重要工作是计算焊接材料定额和汇总。

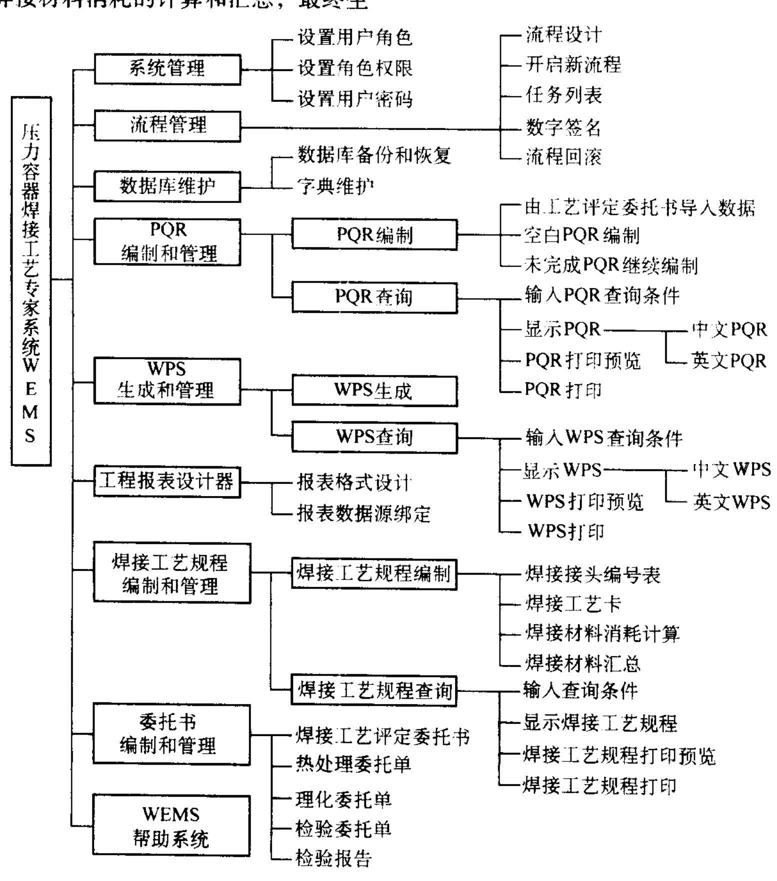


图 7.2-7　WEMS 系统的主要功能

根据上述焊接企业工艺技术活动的内容，本系统应具有如下基本功能：

1）能够实现对焊接工艺评定报告（PQR）、焊接工艺指导书（WPS）、焊接工艺规程、焊接工艺评定委托书等焊接工艺文件的编制、查询、浏览、打印等；

2）能够依据焊接工艺评定标准（如 JB4708—2000）自动推定 PQR 或 WPS 的适用范围，对适用的多份 PQR 或 WPS 进行优选，并根据实际焊接条件进行工艺参数调整，代替工艺人员从事繁琐复杂的焊接工艺卡的编制工作；

3）能够计算焊接接头的焊接材料消耗定额，并按产品进行汇总；

4）能够实现对坡口等图形信息的编辑和有效管理；

5）能够实现焊接工艺评定报告（PQR）的中文、英文浏览和打印输出；

6）能够根据有关焊接工艺标准、规范或规程的要求，模拟人类专家进行焊接工艺评定委托书的设计，并使设计结果基本保证焊接质量；

7）能够就焊接工艺相关知识提供较全面的咨询，包括钢材、焊接材料、焊接物理冶金过程、焊接缺陷等方面的理论知识、资料、试验、计算等。

8）能够满足网络环境多用户使用的要求，包括用户管理和流程管理等；

9）提供必要的在线帮助功能。

4.2.2　系统总体结构

根据上述功能需求，系统的总体结构如图 7.2-7 所示。系统通过以下两种途径来制定焊接工艺：①在 PQR 或 WPS

的基础上，依据有关焊接工艺评定标准，经推理制定焊接工艺规程（焊接工艺卡）。②在焊接工艺设计知识库的基础上，经推理制定焊接工艺评定方案（焊接工艺评定委托书）。对某些焊接行业，该焊接工艺亦可直接用于焊接生产。

WEMS 系统采用面向对象的方法设计了专家系统的核心推理机，并解决了专家系统与 CAD 等软件的链接；工程报表设计器可以根据企业的需要灵活地定制各种格式和内容的报表，在文档界面和报表设计器中都可以直接对包含有图形和数据的工艺报表进行显示预览与打印，而且实现了续页、字体选择和缩放、换行等功能。除此之外，系统还开发了具有通用性的用户权限管理和流程管理系统，使得 WEMS 系统真正成为一个功能完善的、具有良好通用性的系统。

WEMS 系统采用 VC + +6.0 语言开发，数据库采用 ACCESS 2000。VC + +6.0 有功能强大的 MFC 类库支持，可直接调用 Windows 系统 API，运行效率高，编程方式灵活。同时，VC + +6.0 对“对象链接与嵌入”（即 OLE）技术有很好的支持。使用 OLE 技术可以对来自多种应用程序的资料进行方便的集成，生成更加丰富的文档，是实现弧焊工艺专家系统与 CAD 软件通讯的有效技术手段。

4.2.3　知识库和推理机设计

1）知识表达和知识库组织　WEMS 系统的知识表达综合运用了一阶谓词、产生式规则等若干种方法。焊接工艺制定专家系统中的知识一般分为事实和规则两部分。事实是指类似焊接母材的牌号和成分、母材所属的类组别以及焊材的烘干温度和烘干时间等静态知识，适合采用一阶谓词的方式进行表示。例如：

hancai _ tt（“J422”，“150”，“1”）

/ * 表示：焊材“J422”的烘干温度为“150℃”，保温时间为“1 小时” * /

规则则是根据一些已知条件推导出目标结果所必须遵循的原则。专家系统依据工艺事实按照工艺规则进行推理。系统对 JB4708—2000 的条文进行了严格的归纳和总结，进而表达为严谨的知识库语句。产生式规则是 WEMS 系统主要的决策知识表示形式。例如：

bm _ match（id = 9，u _ type = “一般焊接”，cond = [“u _ grp1 = Ⅳ - 3”，“u _ grp2 = Ⅳ - 1/Ⅳ - 2”]，require = [“grp1 = Ⅳ - 3”，“grp1 = grp2”]）

/ * 表示：在“一般焊接”的情况下，如果类组别为“Ⅳ - 3”的母材与类组别为“Ⅳ - 1”或者“Ⅳ - 2”的母材焊接时，可以使用母材类组别均为“Ⅳ - 3”的 WPS 制定焊接工艺 * /

它是 JB4708—2000 中规则“在同类别号中，高组别号母材的评定适用于该组别号母材与低组别号母材所组成的焊接接头”的具体实现之一。

对于焊接位置匹配规则，则采用如下表达：

posi _ match（id = 9，chjrx = "无"，cond = ["平焊"]，require = ["平焊","立焊","横焊","仰焊"]）

/ * 表示：如焊件“无”冲击韧性要求，且焊接位置为“平焊”，则可使用的 WPS 的焊接位置可以是“平焊”、“立焊”、“横焊”或“仰焊” * /

知识库中存储的专家知识和推理规则越全面，在给定条件下经过推理得到结果的概率就越大，也越准确。但对庞大的知识库进行全面搜索势必会影响系统的效率。为此，WEMS 系统采用了知识库分解的方式对庞大的知识库进行管理和有效利用，以提高系统进行推理的效率。知识库的划分包括原始知识库的划分和推理空间的划分两个层面。

根据工艺事实和工艺规则的具体内容，系统将知识库分为母材牌号类组别对应库、焊接工艺评定匹配库、焊后热处理库、母材成分及标准库、焊材成分及标准库等 5 个子知识库。对知识库进行这样的分解，一方面便于对知识库进行管理、组织和维护；另一方面在进行推理匹配的过程中可以根据需要选择不同的知识库，使推理流程更加清晰。

本系统中，WPS 和 PQR 一一对应。在根据用户输入的基本焊接条件制定焊接工艺时，系统需要逐一对大量的 WPS 进行查询匹配，显然系统的效率较低。若能将大型搜索空间分解为若干个小型搜索空间，则可以有效地提高系统查询匹配的效率。

JB4708—2000 标准按照母材的性能对其进行了分类（组），并且规定了在制定焊接工艺时用户输入的基本焊接条件中的母材类组别与 WPS 中焊接试件母材类组别的匹配对应关系。因此，按照 WPS 中焊接试件母材所属的类组别将 WPS 数据库分解为不同的子库，在系统运行时按照用户输入的基本焊接条件中的母材类组别只加载相应的 WPS 子库，可以有效地缩小进行 WPS 搜索匹配的范围。

WEMS 知识库结构见图 7.2-8。其核心是各类“工艺规则库”和“PQR 或 WPS 库”。图中的 PQR 或 WPS 匹配规则用于匹配 WPS 生成焊接工艺卡；焊接规范规则库、焊接热处理规则库、坡口设计规则库等用于自动推荐焊接工艺评定委托书的规范参数。

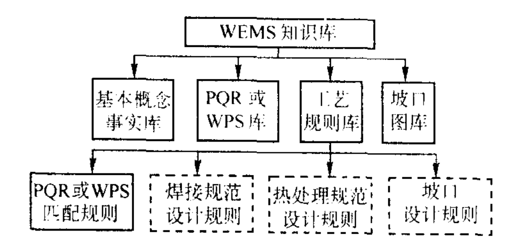


图 7.2-8　WEMS 知识库结构

2）推理匹配流程和推理机设计　本系统采取以正向推理为主的推理方式，即在生成新工艺时，系统从基本焊接条件出发，经过逐级推理形成最终结果。这符合设计人员制定焊接工艺的思路和做法。在已经进行目标空间分解的情况下，正向推理不需要遍历庞大的目标空间，同时可以保证搜索的完全性。匹配 WPS 生成焊接工艺卡的整体工作流程如图 7.2-9 所示。

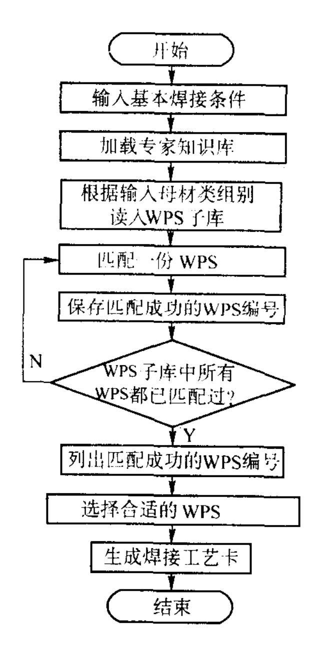


图 7.2-9　匹配 WPS 生成焊接工艺卡的整体流程

在推理中，系统还采取了特殊优先的匹配策略，在同时

存在多条可用知识时，优先选择较为特殊的知识。根据JB4708—2000标准以及企业的要求，系统提出了17项匹配条件，按照匹配的复杂程度及其对是否需要重新进行焊接工艺评定的影响程度，对过程知识进行了适当排序，将简单和无子过程的匹配以及影响程度大的知识排在前面，按照焊接类型、焊接方法、冲击韧性、耐蚀性、拉伸温度、技术措施、焊后热处理、焊接位置、母材牌号、厚度的顺序进行，达到了搜索匹配的优化。

WPS的基本匹配流程如图7.2-10所示。若一份WPS匹配成功，则该份WPS被取出作为生成焊接工艺卡的候选WPS，然后进入下一份WPS的匹配流程。若该份WPS任何一处条件匹配失败，则结束此份WPS的匹配，继续进行下一份WPS的匹配，直至系统遍历整个WPS搜索空间。在WPS的匹配流程中，除了单项条件的匹配外，一些焊接因素的匹配会涉及到若干其他因素，从而具有一定的特殊性和复杂性，如堆焊匹配流程、复合焊接方法匹配流程（图7.2-11）、焊缝匹配流程、母材牌号匹配流程、母材厚度匹配流程等。本系统在推理机的设计中把它们分别作为一个独立的匹配模块，然后嵌入到整体匹配流程中，使得匹配环节准确清晰。

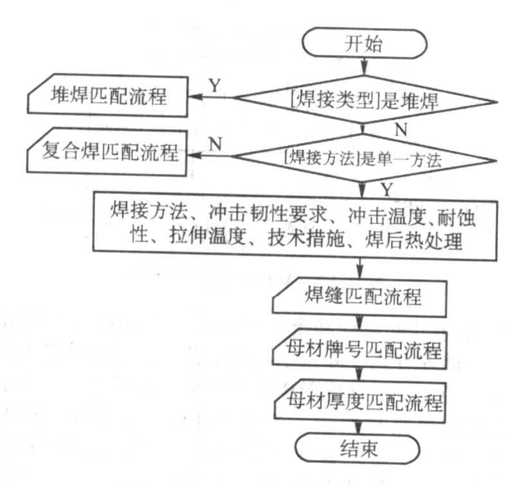


图7.2-10　WPS基本匹配流程

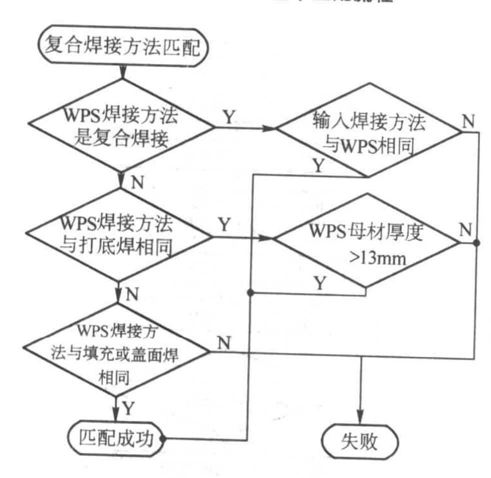


图7.2-11　复合焊接方法匹配流程

WEMS采用爱丁堡大学开发的跨平台C++推理类库CExpr完成字符匹配、递归和回溯等底层推理任务，从而使系统的推理部分和系统的其他部分紧密结合，实现了逻辑推理和基于Visual C++语言开发的用户界面的无缝连接。根据推理的具体需要，系统对CExpr代码进行了一些改写。

此外，系统的推理流程控制采用人机交互的方式，以使用户参与到推理过程中来。系统对用户提出一些选择性的问题，通过用户的选择和回答控制推理的流程，从而使推理更具有针对性，完善了对推理过程中某些细节分支的流程控制。同时交互的推理策略也使用户增强了对专家系统的信任，实现了对推理过程的监控，并且在推理失败时有助于用户对原匹配条件进行修改。

4.2.4　主要功能模块的设计实现

1）PQR和WPS的编制和管理　焊接工艺评定报告（PQR）包含实现焊接要求的全部技术参数和验证性的试验结果，包括材料、焊接工艺、无损检验、力学与金相试验、腐蚀试验、坡口图形等，是按规定格式对焊接工艺的正确性进行评价的记录报告。PQR的编制可以是根据焊接工艺评定委托书的要求进行，也可以是企业为充实PQR数据库而有计划地进行。图7.2-12为PQR的编制界面，其基本数据如母材的钢号和厚度等可由焊接工艺评定委托书导入，也可以手工输入。

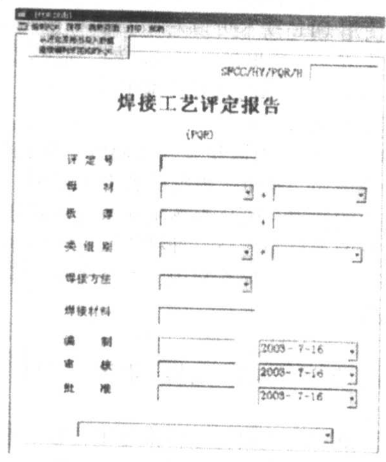


图7.2-12　PQR编制界面（封面）

PQR的管理包括查询、浏览、打印等功能。查询条件输入界面如图7.2-13所示。系统根据输入的查询条件遍历整个PQR数据库，匹配出所有符合条件的记录，供用户选择。对于PQR的浏览和打印，系统提供中、英文两种版本。用户可以选择成套或单页打印。打印预览界面如图7.2-14所示。

焊接工艺指导书（WPS）根据PQR编制生成，和PQR一一对应，WPS中的数据几乎全部可由PQR得到，可以视为PQR中去除各种性能试验数据后的子集。一份PQR编制完成后可直接对应生成一份WPS，也可以通过查询选择一份PQR生成对应的WPS。对于WPS数据库，用户可以进行查询、WPS文档中英文切换、预览和打印输出，WPS的查询条件和PQR查询类似。

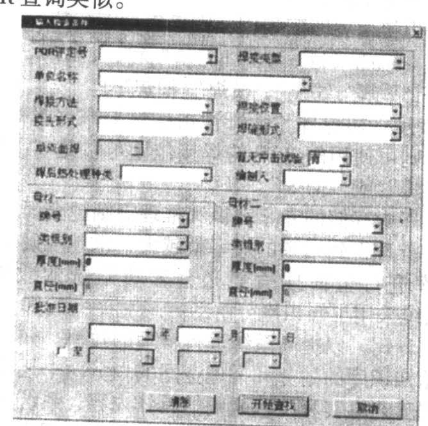


图7.2-13　PQR查询条件对话框



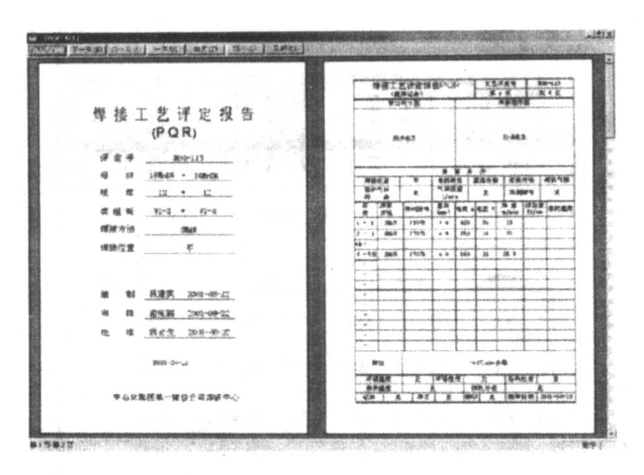


图 7.2-14 PQR 打印预览界面

2）焊接工艺规程的编制和管理 焊接工艺规程包括封面、接头编号表、若干份焊接工艺卡和焊材汇总表。焊接工艺卡用于指导焊接生产，焊材汇总表给出此份焊接工艺规程中用到的全部焊材、焊剂以及保护气的种类和数量。在进行焊接工艺规程编制时，首先进入封面的编辑界面。封面编辑完后，用户可以跳转到接头编号页、焊材汇总页。

在接头编号页中，件号和焊接工艺卡编号根据工艺规程编号进行了预填写。用户输入编码，即形成完整的件号和工艺卡编号。选中要编制的焊接工艺卡，则系统出现图 7.2-15 的匹配 WPS 对话框，其中焊接类型、焊接方法、焊缝形式和母材 1 内容必须输入。堆焊时，母材 2 可以不填写。一般焊接时，母材 2 如果不填写，则默认和母材 1 相同。点击“开始搜索 WPS”，则系统根据 JB4708—2000 标准进行 WPS 匹配，并根据需要询问用户一些信息。用户在多条匹配结果中选择一条合适的 WPS 后，单击“生成工艺卡”，则生成一份新的焊接工艺卡，如图 7.2-16 所示。焊接工艺卡的全部焊接规范和其他一些数据由 WPS 自动生成，用户可以根据需要对诸如电压电流上下限等焊接参数进行适当的修改，并通过 OLE 技术把 AutoCAD 绘制的 .dwg 格式的接头简图导入焊接工艺卡。

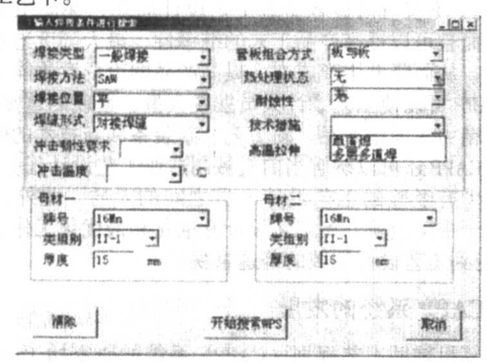


图 7.2-15 WPS 匹配条件对话框

在图 7.2-16 的焊接工艺卡页面中，还提供了焊材消耗计算功能，用来计算按该份工艺卡施焊所需要的各种焊条、焊丝、焊剂和保护气等的用量。当前工艺卡中用到的焊接方法、焊材型号和规格等，系统根据焊接规范自动填入；用户根据接头简图，在焊缝名称下拉列表中选择对应的焊缝名称，填写焊缝参数和长度；并考虑实际焊接中的焊材（焊条、焊丝、焊剂）消耗系数（一个大于 1 的值）。然后在焊材的规格后面填写不同焊材消耗的百分比（百分比之和等于 100%）。单击“焊材消耗”按钮，即可确定此份工艺卡的焊材消耗。

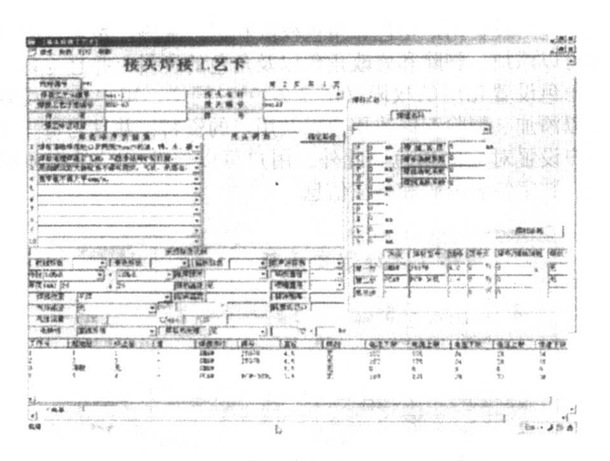


图 7.2-16 接头焊接工艺卡编辑页面

焊接材料汇总表（图 7.2-17）自动将焊接工艺规程各焊接工艺卡的焊材用量进行分类汇总。根据焊接方法的不同，焊材汇总页分 SMAW、SAW 和其他焊接方法三个子表，分别列出了焊条、焊丝、焊剂以及保护气的属性和用量。

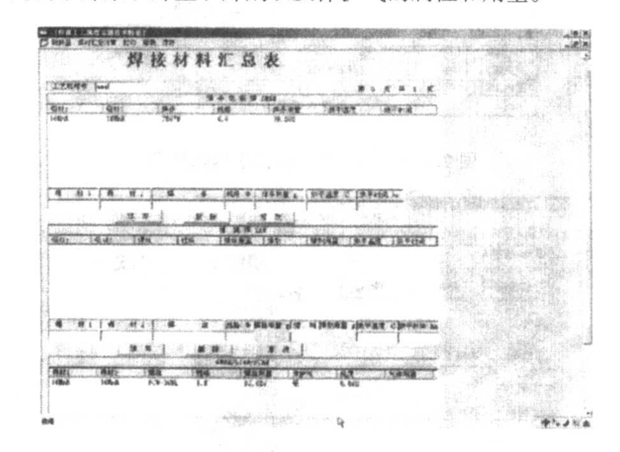


图 7.2-17 焊材汇总页

和 PQR、WPS 不同，焊接工艺规程由若干份焊接工艺卡组成，没有公共的焊接基本参数信息，因此，其查询以规程封面参数作为检索条件。

由于焊接工艺规程不仅包含工艺卡的数目不确定，而且接头编号页、工艺卡页和焊材汇总页都有可能需要续页。特别是焊材汇总页，三个列表区都可能需要续页，要根据续页最多的区来定义焊材汇总的总页数。程序对此进行了处理，在浏览和打印之前准确地计算出此份焊接工艺规程需要打印的页数，用户可以在浏览和打印预览中看到包括续页在内的一份完整的焊接工艺规程的全部内容。

3）焊接工艺评定委托书的编制 如果在制定工艺规程时找不到可以使用的 WPS，则需要制定一份新的工艺评定委托书，此时，用户可以把用来匹配 WPS 生成工艺卡对话框中的数据导入到工艺评定委托书中。图 7.2-18 为工艺评定委托书的编辑界面。编制完成的工艺评定委托书保存在数据库中，用户可以进行查询、显示、修改、删除等操作。也可以进行浏览和打印。类似地，热处理委托单、理化委托单、检验委托单等也可以进行编制、查询和浏览等。

4）用户和流程管理 在 WEMS 系统中，用户权限管理采用用户－角色－权限模式。角色是某一类权限的集合，通过角色这个中间层，每个用户所需要管理的仅是角色的集合，工作量大大减少。其中用户和角色、角色和权限都是多对多的关系。

WEMS 系统管理的功能就是对用户－角色－权限进行设

定，包括设置用户角色、角色权限和用户密码。角色权限设置可以添加、删除和修改角色以及角色的资料，并且为每一个角色设置相应的权限（图7.2-19）。同样，用户角色设置可以添加、删除和修改用户以及用户的资料，并且为每一个用户设置对应的角色。此外，用户可以修改自己的登录密码、数字签名密码和备注信息。

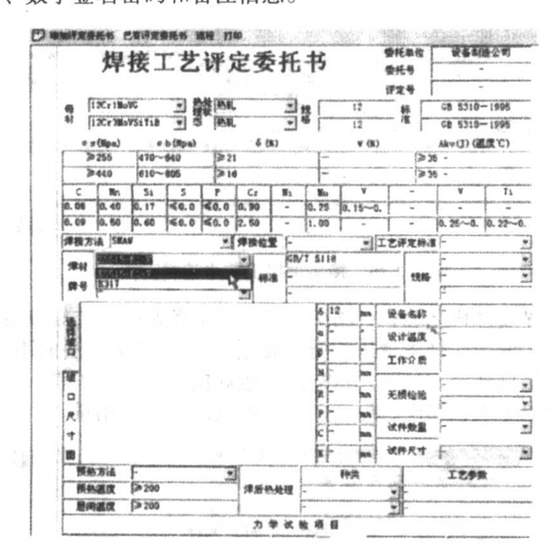


图7.2-18　工艺评定委托书编辑界面

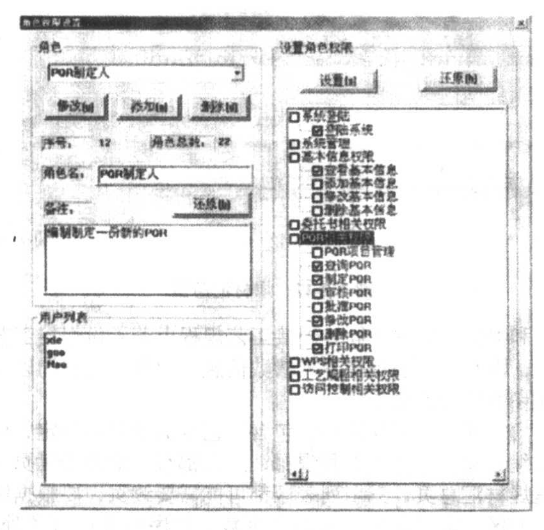


图7.2-19　角色权限设置

WEMS系统还开发实现了基于权限的流程管理和控制，将工艺制定的各个流程和环节进行清晰的划分，明确各个流程和环节的任务和责任，实现环节和权限的绑定。系统设定了委托书制定、PQR制定、WPS制定、工艺规程制定等流程，每个流程设定了制定、审核、批准三个环节。

系统流程管理的单个流程最大环节数为5，也就是说，当用户认为流程中三个环节不够时，可以增加到5个环节。对于初始流程设计，用户需要设置流程名、环节数、环节名、流程起动权限、各环节执行权限等项目。在流程再造时，用户可对上述项目进行修改。图7.2-20为流程管理界面。上半部分显示当前正在进行的所有流程的信息，包括流程名、流程起动人、各环节名、各环节执行人、环节完成状态等项目。下半部分为当前所选择的流程信息。管理员可以查看流程的完成情况，修改指定环节的执行人。也可以根据需要删除无效的流程项目。此外，流程的执行人员可以通过项目留言向其他执行人员传递信息。



图7.2-20　流程管理界面

5）数据库维护　数据库维护包括对系统中用到的一些非限定性数据库进行添加、修改、备份、恢复等操作。如母材类组别数据库、母材成分和力学性能数据库等。此外，WEMS系统针对PQR、WPS文档提供了中文、英文两种版本，英文版本通过查对dictionary.exp文件翻译实现。被授权的用户可以通过点击“字典维护”菜单查看dictionary.exp文件，添加或者修改其中的中英文对照内容。

5　计算机辅助焊接工艺规划CAPP系统

伴随计算机技术的发展，针对产品设计、产品工艺规划和产品制造等生产环节分别形成了计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助工艺规划（CAPP）和计算机辅助制造（CAM）等计算机辅助技术，CAD设计信息只有经过CAPP系统才能变成CAM的加工信息，生产管理和设计调度等部门也必须依靠CAPP系统的输出数据。因此CAPP是实现计算机集成制造系统（CIMS）和企业管理的重要环节。

CAPP不仅可以显著缩短工艺设计周期，保证工艺设计质量，而且可以提高产品工艺的继承性，最大限度地利用现有资源，从而降低生产成本，提高产品的市场竞争能力。同时，CAPP可以使工艺设计人员摆脱大量、繁琐的重复劳动，将主要精力转向新产品、新工艺、新装备和新技术的研究和开发。CAPP还可以缓解当前机械制造业工艺设计任务繁重，但又缺少有经验的工艺设计人员之间的矛盾。此外，CAPP也有助于推动企业开展工艺设计标准化和最优化工作，因此CAPP受到工艺设计领域的普遍重视。

5.1　CAPP系统的发展

计算机辅助工艺规划（CAPP）系统的研究始于20世纪60年代后期，第一个CAPP系统是挪威1969年推出的AUTOPROS系统，1973年正式推出商品化的AUTOPROS系统。美国国际计算机辅助制造公司在1976年推出了自动工艺设计系统CAM—I'APP。国内的CAPP研究更是从20世纪80年代初期才开始，但是涌现出了许多优秀的CAPP系统，如APPAS系统、TOJICAP系统等。

20世纪80年代，CAPP的研究受到世界工业界的广泛重视，1985年和1986年，美国机械工程师协会（ASME）连续两年召开CAPP的学术研讨会，1985年和1987年，国际生产工程研究会（CIRP）连续两次召开CAPP专题讨论会。目前，国内外各类生产（制造）自动化学术会议、计算机集成制造技术学术会议等都设有CAPP或CAD/CAPP/CAM或人工



智能技术在 CAPP 中的应用等专题。

由于国外制造业的自动化进程开始较早，程度较高，相应的计算机辅助体系较为健全，因此国外 CAPP 的研究比较注重 CAPP 作为子系统与其他计算机辅助环节的结合。例如对 CAPP 在柔性制造系统（FMS）与计算机集成制造系统（CIMS）中的应用做了较多的研究。国内在 CAPP 的若干相关关键技术，如零件的建模与结构编码、CAPP 开发工具、CAPP 工艺生成的智能化方法等方面取得了很多的成果。目前，CAPP 系统在实际应用中已显示出了巨大的潜力和明显的社会经济效益，反过来，CAPP 系统的研究也在工业应用的推动下得到了进一步的发展。

随着人工智能技术的发展，以人工智能为基础的创成式 CAPP 系统的研究和开发也引起了人们的重视。然而，基于知识表示及推理的专家系统技术虽然能够在一定程度上满足 CAPP 系统工艺自动生成的要求，但存在工艺知识获取“瓶颈”问题与推理过程中出现的“匹配冲突”或“组合爆炸”等问题，而且系统开发周期长，费用较高。基于 ANN（人工神经网络）的 CAPP 系统虽然避免了专家系统中知识获取的“瓶颈”问题，不存在推理的“组合爆炸”和“匹配冲突”等问题。但知识处理网络用来构造系统的数据必须是精确的，而且限于现有的技术条件，应用人工神经元网络（ANN）技术所能建立的神经元网络的结构（包括网络层数、输入、输出及隐节点的个数）往往是较为简单的，无法满足实用的要求。因此，目前，CAPP 技术的研究与开发重点主要是为工艺设计人员提供软件工具，同时为企业的信息化建设提供服务，以满足企业 PDM 或 MRPII 甚至 ERP 信息系统的需要。

5.2　CAPP 系统的类型和特征

归纳起来，CAPP 系统的基本类型主要有派生式、创成式、综合式、智能式和交互式等五类。它们的原理、方法及特点见表 7.2-16。

表 7.2-16　CAPP 的基本类型及特征

类型	原理与方法	特点
派生式	利用 GT（成组）技术将零件按照几何形状及工艺的相似性分类、归族，每一族都有一个典型的样件，用这个样件设计出相应的典型工艺文件，存入工艺文件库内。在需要设计一个新零件的工艺规程时，输入零件的信息与编码，由计算机检索出相应零件族的典型工艺，根据零件结构及工艺要求，对工艺进行修改，得到所需的工艺规程	系统结构较为简单，易于建立生产上实用的系统。适合于大量相似零件的生产。其缺点是未摆脱对工艺人员的依赖，应用效果依赖于工艺设计人员的知识和经验水平。系统的柔性差，修改扩充困难，不易适应生产技术和条件的变化和发展
创成式	应用决策树和决策表等方法，通过工艺决策逻辑与算法从无到有自动生成零件的工艺规程。 由于零件结构的多样化、工艺决策随环境变化的多变性及复杂性等诸多因素，系统对不同环境的可重用性差	以逻辑算法和决策表为特征，基本上排除了人的干预，使工艺规程的编制不会因人而异，容易保证零件工艺规程的一致性。同时它可以通过决策逻辑的程序实现将工艺专家的智能和技术诀窍存储起来
综合式 （半创成式）	将创成式 CAPP 系统和派生式 CAPP 系统结合起来，一般以成组技术为基础，采用检索与自动决策相结合的工作方式，根据输入信息进行逻辑判断，自动选择标准工序（工步）生成新工艺规程。此类系统具有一定的人工智能。不是从零开始进行分析、推导产生工艺规程，而是对现有成熟的工艺进行分析、归纳、总结、提高而实现最优化	我国现有 CAPP 系统大多采用这类系统
智能式	将人工智能技术应用到 CAPP 系统中所形成的 CAPP 专家系统。制定新产品的工艺规程是根据数据库中的当前数据，激活知识库中的相关知识，通过逻辑推理实现的	智能型 CAPP 以推理加知识为特征，它把工艺规程中的大量专家知识和经验，以计算机编码的形式存放在知识库里
交互式	以人机交互、人机互补的方式完成工艺规程的设计，工艺规程设计的质量对人的依赖性很大	系统具有开放性、通用性的特点，并有一定的人工智能。这类系统强调人在工艺决策中的作用，实用性较强

5.3　CAPP 系统的开发模式

尽管 CAPP 系统有表 7.2-16 所述的各种类型，但从总体上看，可以把开发 CAPP 系统归纳为两种模式：专用型 CAPP 系统和工具型 CAPP 系统。

（1）专用型 CAPP 系统

专用型 CAPP 系统是专门为某一生产企业或部门开发的，它的制造资源数据、工艺决策和其他系统功能是针对具体的应用背景而设计的。这就使专用型 CAPP 系统具有如下特点。

1）针对性强　由于专用型 CAPP 是针对某类零件或产品而开发的，因而与企业的实际情况结合的比较好，工艺决策的质量也比较高，对企业内部的一般性变化能很好地适应。对于产品类型专业化、产品结构、工艺复杂的企业，开发专用型 CAPP 系统是非常适用的。

2）适应性有一定的局限　生产企业在产品类型、工艺方法以及生产组织结构上发生变化时，专用型 CAPP 系统的扩充和更新较为困难。

3）开发周期长　专用型 CAPP 系统的开发没有商品化的标准模块，一般从系统的基本功能开始，而达到实用必须经过较长时期的调试和完善。

（2）工具型 CAPP 系统

与专用型 CAPP 系统相比，工具型 CAPP 系统的基本特征是其工艺决策方法和其他系统功能实现了通用化。工具型 CAPP 系统可以分为框架型 CAPP 系统和开发工具型 CAPP 系统。

框架型 CAPP 系统提供给用户一个固定的 CAPP 系统框



架。用户可以通过用户界面根据本企业的情况，输入数据和知识。这样就形成了一个面向特定的制造环境和工艺习惯的具体的 CAPP 系统。框架型 CAPP 系统具有以下特点：

1）适用面广　对于同行业或产品类型和工艺手段相似的企业，它们在制定工艺规程时，主要的不同是制造资源和工艺习惯带来的差异。而框架型 CAPP 系统能够很好地适应这种差异。

2）大大地缩短了 CAPP 系统的开发周期

3）有一定的局限性　在框架型 CAPP 系统中，由于工艺知识的表达、工艺决策方法等都已基本固定，因此，其仍然具有很强的针对性，对企业较大的变化缺少足够的适应能力。

开发工具型 CAPP 系统是把 CAPP 系统的功能分解成一个个相对独立的工具。针对不同的应用环境，在开发平台上构造符合用户需要的 CAPP 系统，也可以将开发平台提供给用户，使用户可以进行 CAPP 系统的二次开发。开发工具型 CAPP 系统适用面广、开放性好，可以适应各种应用环境，而且由于具有二次开发能力，可以适应企业内部发生的较大变化。

无论是专用型还是工具型，作为一个面向机械制造用户的软件系统，实现有效的工程应用无疑是开发 CAPP 系统的根本目的。但随着人工智能技术、集成技术的发展，特别是专家系统和 CAD/CAPP/CAM 集成技术的研究和应用，有些人把 CAPP 的目标设定为开发代替工艺人员的自动化系统，过分地强调"自动化（Automation）"，曲解了 CAPP 系统"辅助（Aided）"的本意，从而必然导致开发周期长、费用高，系统适用性差，工艺人员难以掌握系统的应用，不易推广，难以实现技术与管理的集成，不利于企业全面实现工艺设计与管理的计算机化等问题的存在。其实在开发 CAPP 系统的过程中，时刻注意其"辅助（Aided）"的目的，如果能够充分利用计算机高效地完成建立包括报表生成、存储及工艺规程管理、修改等在内的工作，就可以节省工艺设计时间的40%，从而可以大大提高工作效率和达到规范化工艺设计的目的，因此我们在开发一个 CAPP 系统时应以智能化为基础，而以实用化为目的。

5.4　CAPP 系统的发展趋势

CAPP 作为 CIMS 的关键技术，已经历了从派生式、创成式到两者相结合的混合方式几个阶段，广泛采用了成组、系统工程、数据库以及人工智能和专家系统等技术，扩大了系统的功能，目前集成化、通用化和面向对象开发技术正成为 CAPP 发展的新趋势。

（1）集成化与产品数据交换标准

随着 CAD、CAM、CAPP 系统的应用逐步增多，企业迫切需要将这些孤立的系统整合成一个整体以发挥更大的效益。这种 CAD/CAPP/CAM 的集成一般称为局部集成。由于企业越来越意识到计算机在日常生产规划和管理中的巨大潜力，MRPII 和 PDM 也为越来越多的企业所采用，CAPP 如何与它们进行有效的集成也成为了当前 CAPP 系统研究的一个重要内容。

CAPP 系统向前与 CAD 集成，以解决 CAPP 系统的零件信息输入问题；向后和 CAM 集成，为 CAM 提供加工信息。但是由于 CAD 系统千差万别，用户应用水平参差不齐，全面、准确地从设计图纸中获取信息是 CAPP 技术的难点之一。为了克服这个难题，一般的解决方法是采用自定义的接口，有的 CAPP 系统与同属自身开发的 CAD 相衔接，而有的 CAPP 系统则是通过自定义的规则与 AutoCAD 等商用 CAD 相衔接。这样做都能在一定程度上实现 CAD/CAPP 的衔接，但接口规范的各异限制了企业用户对 CAD/CAPP 系统的自由选择，也不利于集成化技术的标准化。

上述集成也可以通过 CAPP 系统与制造资源计划 MRPII 或产品数据管理系统 PDM 的集成来实现。MRPII 是指以物料需求计划 MRP 为核心的生产计划与控制系统，主要强调对人、财、物等制造资源的管理。CAPP 系统与 MRPII 集成的内容包括：CAPP 系统从 MRPII 系统中提取产品"设计 BOM（材料明细表）"中的相应信息以进行新工艺的制定；从由 CAPP 系统制定完成的工艺中提取相应的工艺信息输入到 MRPII 系统中形成或修改"工艺 BOM"。PDM 是管理所有与产品相关的信息和过程的技术，CAPP 系统的输入和输出都是 PDM 的管理对象，因此 PDM 与 CAPP 的集成即 PDM 为 CAPP 提供 CAD 的设计信息，并接纳和管理 CAPP 输出的工艺信息，同时传递到下一个环节。

CAPP 与其他系统的信息集成方式主要包括三种。初期采用的方式是通过专用数据格式文件进行产品信息交换，在这种方式中，相互间的数据交换存在于两个系统之间，当子系统较多时，不仅接口程序增多，而且编写接口时需要了解的数据结构也较多，当一个系统的数据结构发生变化时，引起的接口程序的修改量较大。

目前广泛采用的集成方式是通过标准数据格式的文件交换产品信息，系统中存在一个与各子系统无关的标准格式，各子系统的数据通过前置处理转换成标准格式的文件，各子系统也可通过后置处理将标准格式的文件转换成本系统所需要的数据。这种集成方式，每个子系统只与标准格式文件发生联系，而不需了解其他系统的数据结构，接口数目显著减少，为开发者和使用者提供了较大的方便，降低了接口的维护工作量。但并没有解决各子系统间的模型统一问题，并且运行效率较低，还不是一种十分理想的集成方式。

为了提高数据交换的速度和效率，保证数据交换的完整性和可靠性，必须在集成化的系统中采用统一的数据规范，以便于对各种数据的统一处理，从而大大减少输入/输出时间，提高系统的自动化水平。为此，建立 CAD/CAPP/CAM 范围内相对统一的基于特征的产品定义模型，并在此基础上运用产品数据交换技术，可以有效地实现 CAD、CAPP、CAM 之间的数据交换和共享。产品数据交换标准 STEP 即是以此为基础进行产品信息交换，它采用统一的产品数据模型，统一管理产品数据，各子系统间直接进行信息交换，从而大大提高了系统的集成性。

CAPP 的集成除上述方面外，还体现在内部的功能集成上。一般而言，CAPP 主要解决产品的工艺设计和规划问题，但在实际生产中，产品的工艺设计和规划与产品的材料消耗定额和工时消耗定额等是分不开的，因此往往要求 CAPP 不应只解决工艺设计的问题，而要求同时集成材料消耗定额和工时消耗定额等内容，由此实现生产的科学管理。

（2）通用化

随着 CAPP 被越来越多的企业所应用，以往量体裁衣式的"一对一"开发方式已经无法满足 CAPP 市场快速增长的需要，而且传统 CAPP 相对漫长的软件开发周期以及缺乏专业化的软件培训和软件维护队伍往往使得 CAPP 的作用无法得到完全的发挥，阻碍了 CAPP 在企业中的应用。同时，企业面对快速变化的市场，也要求 CAPP 系统能适应快速、多变的产品柔性开发的要求，而传统的专用型 CAPP 系统很难满足。由于上述原因，CAPP 的通用化研究得到广泛重视，得到很多企业的认同。

适合多个企业应用的通用化的 CAPP 系统除了在功能上必须具备 CAPP 必需的基本功能以外，还应该包括软件开发规范化和工具化两个特点。

1）软件开发规范化　软件的生命周期为越来越多的企业所重视，企业除了关注 CAPP 软件本身功能之外，越来越

重视软件的可维护性以及软件开发者的软件维护能力，以保证实现计算机辅助工程的可持续发展。只有保证规范化开发，才能保证CAPP软件可以快速适应不同企业的要求，并持续、有效地在多个企业发挥作用。

2）工具化　由于不同企业的产品、同一企业不同时期的产品等差异很大，而要求CAPP给出的输出内容和格式也千差万别，因此很难要求通用化的CAPP对企业的具体特点做到面面俱到，因此工艺制订阶段的一部分甚至大部分内容就必须交由工厂的工艺人员通过人机交互来完成，而此时的CAPP则在更大程度上起到一个工艺编辑工具的作用。

（3）面向对象开发技术

面向对象（O－O：Object Oriented）的开发方法是目前软件开发技术的主流，也成为解决开发CAPP系统时所遇到困难的一个重要推动力。研究如何利用面向对象的开发方法来开发CAPP系统是CAPP软件逐步完善的要求。例如，由于传统的CAD软件不能直接连接属性数据，而目前的CAPP大多数都基于关系数据库，两者之间难以实现数据交换和共享。新近发展的部件模型技术（COM）提供了解决的方案，并开发出了基于COM技术的CAPP系统。

对象化是一种思维抽象的模式，CAPP的对象化研究包括面向对象的建模、面向对象的工艺管理模式和面向对象的开发方法等内容。面向对象的CAPP建模基于实体特征模型，集CAPP环境的结构特性、行为特性及知识规则于一体，扩充了数据抽象性、封装性、继承性以及执行时的信息传递等面向对象的特征。知识规则建模类似于一般的创成式系统，行为特征包括基本的数据库知识操作和复杂的机械加工操作、工艺设计中的各种操作等。这样数据和程序被封装在一起形成对象，对象可以分类，CAPP应用中的对象和子类形成树状结构，自然地表达了CAPP系统中相关工艺的继承性。采用面向对象开发技术将系统的一些较为独立的通用模块封装起来，赋予其独立的接口，便于与其他模块的相互调用，更加有利于分布式系统的建立和提高整个系统的通用化。

目前多数CAPP系统的工艺管理功能均采用了以产品作为着眼点来组织工艺文档的面向对象（即产品）的工艺管理模式。这种模式将文档按照所属产品构成的产品树状结构来进行创建和管理，不仅直观、高效，而且不易出错，受到广大工艺管理人员的欢迎。

6　焊接CAPP系统的开发及实例

早期的CAPP系统主要集中在机械加工方面，近年来人们日益认识到CAPP系统的重要性，已经将CAPP系统的应用范围扩大到各种工艺过程。前面提到的焊接工艺制定等软件可以认为是焊接结构件生产CAPP系统的一部分，但主要是针对每条焊缝焊接时工艺参数的确定，并没有涉及焊接结构件生产的全过程。焊接结构件生产的全过程包括：焊接结构件中每一零件生产工艺路线的确定，零件和部件在装配焊接时工序和工步的安排和技术要求，最后形成完整的焊接结构件配焊工艺。

6.1　焊接结构件的装焊工艺特征

焊接结构件的装配焊接工艺主要是指组成焊接结构件的零部件装配、焊接的先后次序及相应的内容，也就是一个焊接结构件的实际生产过程，通常不含零部件本身的具体加工，如：下料、成形等。而焊接结构件装配焊接工艺的设计，就是通过对焊接结构件的结构和功能的分析，对其整体装配焊接工艺进行规划，确定具体的加工工艺路线和内容，包括工装夹具、焊接设备和方法、焊接参数等，从而保证整体装配焊接工艺的完整性和有效性的过程。

焊接结构件的装配焊接工艺设计相对于机械加工的工艺设计而言具有以下几个特征。

首先，焊接结构件形状复杂、特征变化很多，结构特征的表述难度很大。相对而言，冷加工零件几何形状比较有规律，相互之间有很多相似之处，容易利用成组技术，通过分类编码或是其他方法，可以较完全地覆盖零件的结构和工艺信息，并借此生成完整的工艺。

其次，焊接加工中焊接材料种类多，环境条件复杂，它们的变化对焊接参数、焊接工艺流程的影响很大，并且由于焊接属于热加工，是一个经验性很强的加工技术，难以找到实用、可行的规律，也很难抽象出一个数学模型进行仿真。而冷加工机械化自动化的实现相对较容易，对机床等进行控制也比较实际，加工参数和顺序容易确定。

第三，焊接结构件的制造是装配和焊接的组合加工过程。它们既有一定的独立性，又有极为密切的联系。装配过程将焊接结构件的各零部件按工程要求进行合理的排列，结构件的结构越复杂、零部件数量越多，其构成的解空间就越复杂。而且相同的结构采用不同的焊接顺序，也会产生不同的结果，这些都增加了解决问题的难度。

第四，装焊工艺的确定和焊接应力、变形、结构精度、焊接的可达性等有关，甚至影响焊接方法的选择、焊接自动化程度等。除了装配焊接以外，与之相关联的还有很多辅助工序，如油漆等。这些相关工序的加工顺序随机性很大。

然而，焊接结构件作为一种机械结构件，其本身具有相对的稳定性。在同一类焊接结构件中，无论结构，还是功能，都具有一定的相似性和继承性，根据结构、功能相似，工艺相似的原则，同一类焊接结构件的装配焊接工艺也具有一定的相似性和继承性。

6.2　焊接CAPP系统的开发

相对于机械加工CAPP而言，焊接结构件计算机辅助工艺规划CAPP系统的研究工作还不够深入，研究水平还有较大的差距，而且发展缓慢，可以说还处于刚刚起步的阶段。如清华大学与张家口煤机厂合作开发的通用焊接结构件CAPP系统、与太原重型机械厂合作开发的起重机主梁装焊CAPP系统、焊接零部件工艺规划及材料工时定额集成系统等。这些系统针对的主要是焊接生产中的下料和零件制造部分，对于焊接结构件的整体装焊工艺涉及较少。而清华大学与徐州工程机械厂合作开发的“压路机焊接结构件装焊CAPP系统”是对焊接结构件装焊CAPP系统的有益尝试。

焊接结构件生产CAPP系统可以简单地概括为，在计算机辅助下编制焊接结构件的零（部）件工艺路线表、焊接装配工艺过程卡、焊接装配工序卡等。编制焊接结构件的零（部）件工艺路线表，首先要根据产品图纸列出产品中的零部件明细表（BOM），其中的数据最好由CAD或PDM系统的明细表和标题栏中直接提取，然后根据零部件的具体情况、企业的生产习惯、企业中现有设备的加工能力等条件制定零部件的工艺路线，例如：板材的下料可以是剪切或气割，气割又可以选择数控切割或手工切割等，下料后要不要打磨、开坡口、校正等。计算机辅助编制焊接结构件的零（部）件工艺路线表系统的功能可以因企业要求的不同而不同，最简单的CAPP系统只要计算机给出结构件零（部）件工艺路线表的模板，其中的内容完全由工艺人员输入。稍微完善一些的CAPP系统，可以在系统中存储有若干典型的焊接结构件零部件工艺路线以便工艺人员直接选用，再进一步还可以根据企业的具体条件在系统程序中写入一些规则，使系统具有一定的智能化的功能。当然要使系统完全智能化不太可能，系统可以为用户提供自行编制或修改工艺路线的能力，这样系统就具有了一定的柔性和开放性。焊接结构件的零（部）



件工艺路线表中既然已经列出了产品的每一零部件的明细表和工艺路线中的每一道工艺，所以往往将每一零部件的材料用量和工艺路线中的每一道工艺所需的工时也一并填入表中。有了这张内容比较完整的表，并将其中的数据存入数据库中，不仅便于修改和检索，而且使得工艺数据得以共享、企业制定工艺路线的经验得以继承。

焊接装配工艺过程卡、焊接装配工序卡等工艺卡片的内容和格式，因企业生产习惯和生产规模的不同而不同。为了能由计算机辅助编制焊接装配工艺过程卡、焊接装配工序卡等工艺卡片，也可以开发和上面编制焊接结构件的零（部）件工艺路线表类似的软件。

焊接结构件装配焊接工艺的复杂性和特殊性给传统的CAPP系统研究与开发方法在焊接结构件CAPP系统中的应用造成了根本性的困难。然而企业信息化建设和CAPP的迅速发展和应用又对解决这一问题提出了迫切的要求。根据装焊工艺的特点，结合传统CAPP系统的开发方法和发展趋势，以及开发装焊CAPP系统的经验，一个实用的焊接结构件装焊CAPP系统的开发应遵循以下原则。

1）加强CAPP系统与工艺人员的人机交互　首先需要明确的是：CAPP系统只是辅助工艺人员完成工艺设计的工具，而不是完全取代工艺人员自动进行工艺设计。工艺人员和计算机组成“人机一体化”的智能系统，工艺人员仍是工艺决策的主体，而CAPP系统只是利用检索原有数据和进行工艺的派生等技术进行局部而非全部工艺的自动化决策，将CAPP定位为一个基于工艺文档编辑工具之上的系统。因此CAPP系统必须向用户提供功能足够强的工艺编辑工具，包括文档的处理（如检索、相关信息的同步更新等）、图形的处理（如从CAD图纸中截取工艺简图，提供绘制工艺简图的CAD子环境等）、工艺文档的管理（包括工艺文档的归类、增删改、打印等）工具等。

加强人机交互可以通过允许工艺人员干预工艺的制订以简化工艺生成过程，从而简化CAPP系统的内部逻辑，弥补焊接结构件CAPP系统因其信息建模及智能化生成工艺困难而造成的不足。首先，对于计算机难以表示或总结，而实际上很直观或者利用经验可以解决的部分，应充分利用工艺人员的经验和对零件的直观认识来做出工艺决策。其次，要将工艺决策分成若干阶段，保证工艺人员与计算机有充分的交互机会，并且工艺人员应拥有足够的权力去接受、修改、或者推翻计算机的运算结果。第三，应提供多种工艺生成方法（检索、派生等以及各种方法的综合）供用户选择。各种方法的自动化程度不同，以满足新工艺相对已有工艺相似程度不同的各种情况。

2）兼顾专业化和通用化　通用化是目前CAPP研究与发展的一个重要方向，而CAPP的决策智能化要求CAPP系统具有较高的专业化程度。只有与企业特定应用环境牢牢结合在一起，形成专业化的工艺推理和决策模型，才有可能在当前的人工智能技术条件下，为工艺人员提供较实用的智能化工艺决策方案。两者的结合可以通过将专业化工艺决策工具嵌入通用化CAPP平台的方法来实现。

在通用化方面，首先应保证软件的规范化开发，以保证将来维护和升级的顺利进行。其次是提高软件的适应性，如提供可以修改格式的工艺文档模板以满足不同企业对工艺文档格式的要求，提供工艺文档管理和用户账号管理等通用管理工具，采用科学的软件开发技术以提高软件对不同运行平台的适应能力等等。在专业化方面，需要积极摸索焊接加工工艺的规律。尽管装配、焊接加工工艺比较复杂，但是针对较小范围的某几类产品，充分利用产品的特点，寻找出其中的规律，运用各种智能化技术，开发出适用于这一类产品的专业化的工艺辅助制订模块还是很有可能的。然后再通过逐步扩充来提高规律的适用面。

3）CAPP系统的柔性和集成性并重　CAPP系统的柔性主要是为了满足企业快速变化的需求。一方面市场的快速变化要求企业迅速做出反应，利用包括CAPP系统在内的CIMS更改产品的设计或者开发新产品，另一方面企业内部规章制度、办公环境等的变动要求CAPP系统与之相关的内容必须快速更新。而CAPP系统的集成性是CAPP充分有效利用的前提，不能和其他系统进行集成（包括CAD/CAM，MPRII，PDM等），CAPP就只能是信息的孤岛。CAPP系统的柔性和集成性在某些方面是互相冲突的。要求CAPP系统适应一个特定的环境以保证其集成性，那么其柔性必然差，反之亦然。

在设计用户管理模块、工艺文档管理模块、卡片格式定义模块等可能随企业要求不同发生较大调整的模块时，应该保证用户管理策略、工艺文档管理策略、卡片格式的表示等是可以更改的，这样才能满足企业不断发展的要求。当然，这将给软件的开发带来一定的难度。

6.3　计算机辅助焊接工艺规划WCAPP系统

焊接结构是由各种类型的焊接零部件组成的。在以往的焊接零部件生产准备活动中，焊接零部件的工艺规划由工艺部门完成，而工时定额计算与汇总由劳资部门完成，材料定额计算与汇总则由供应部门完成。这种运作方式在很大程度上降低了生产准备工作的效率，往往会出现工艺已经制定完毕，但材料定额还没有确定，从而使结构材料和焊接材料的供应无法到位，或者工时安排存在偏差，使生产进度互相牵制，这种生产过程的不协调对企业生产造成很大影响。因此，许多焊接结构生产制造企业迫切需要一个针对整个焊接结构生产的管理协调系统来进行生产准备工作。

计算机辅助焊接工艺规划WCAPP系统是清华大学与太原重型机械集团有限公司焊接分厂合作开发的重型机械焊接零部件工艺设计和规划CAPP系统。该系统在制定一个焊接零部件从下料开始到最后装配焊接形成产品的工艺工序的同时，完成工序工时、结构件材料和焊接材料定额的计算和汇总，最终形成一个可以指导整个焊接零部件生产全过程的包含工序工时及材料定额的技术文档，从而使工艺规划和生产准备工作更加科学，有效地提高了生产准备和管理效率，缩短了生产周期，实现了工艺制定与材料及工时定额计算的规范化、标准化和科学生产，增强了企业的竞争力。

6.3.1　需求分析

根据实际生产与应用的要求，WCAPP系统需要实现如下主要功能：

1）对产品设计明细表进行提炼，将与焊接加工有关的零部件信息转换为焊接明细表；

2）对焊接明细表中的零部件进行加工工艺工序制定；

3）对焊接零部件的结构件材料消耗定额、焊接材料消耗定额和工序工时定额进行计算；

4）对工时定额和材料消耗定额进行统计汇总，生成各种报表以备预览及打印；

5）实现用户权限管理和工作流程管理，以使系统在多用户网络化运行时保证系统的信息安全；

6）提供独立的工序工时定额、焊接材料消耗定额和结构件材料消耗定额计算模块，以便于用户灵活使用，如审核系统对材料定额、工时定额的计算结果；

7）为方便用户使用，提供Windows风格的在线帮助系统。

系统要求输出的工艺文档报表包括“焊接零部件备料工艺卡”（如图7.2-21所示，包括每一个焊接零部件的工序和工时信息等）、按产品对每一种工序的工时进行汇总的“工



时产品汇总表”、按部件对每一种工序的工时进行汇总的“工时部件汇总表”、包含所有焊缝焊接方法、接头类型、焊接材料种类及消耗等的“焊缝明细表”、按部件对每种焊接材料的消耗进行汇总的“单位产品焊接材料消耗定额汇总表(部件)”、按产品对每种焊接材料的消耗进行汇总的“单位产品焊接材料消耗定额汇总表(产品)”、按产品对每种采用数控切割方式下料的钢板的消耗进行汇总的“单位产品主要材料消耗定额汇总表(数板)”、按产品对每种采用非数控切割方式(如机割、手割等)下料的钢板的消耗进行汇总的“单位产品主要材料消耗定额汇总表(钢板)”、按产品对每种型材的消耗进行汇总的“单位产品主要材料消耗定额汇总表(型材)”、“标准件外购件材料汇总表”及“焊接明细表”。

焊接零部件备料工艺卡

工作令 10　　产品名称 21m 相数起重机　　产品编号 70201020-18　　第 页共 页

编号	件号	图号	数量	材料	净重	工艺	工序及工时定额													备注
		名称					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
10	0	A4084.21.01.00	4		2173.550	ZJ														S
							0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
11	1	A4084.31.21.01.100	4		420.720	H1、RC、JS、RC、H1、JS、JZ														DL
							0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
15	5	A4084.31.21.01.200	4		418.240	H1、RC、JS、RC、H1、JS、JZ	X	G												DL
		130a-2000					1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
30	20	A4084.31.21.01.08	4	O235-A	5.600	H1、JS、ZJ	X	G3	M	P3	O									
							0.56	0.14	0.42	2.39	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
72	59	A2167.32.21.09.09	8	O235-A	0.880	H1、ZJ	X	G2	M	P	Y									
		6×700-1200					1.30	2.08	0.64	0.63	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

图 7.2-21 焊接零部件备料工艺卡

6.3.2 系统总体结构

根据需求分析可以确定系统的工作流程(图 7.2-22)和总体结构(图 7.2-23)。

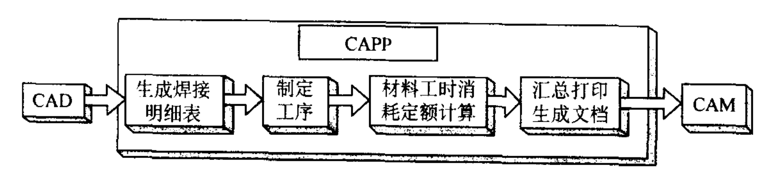


图 7.2-22 WCAPP 系统的工作流程

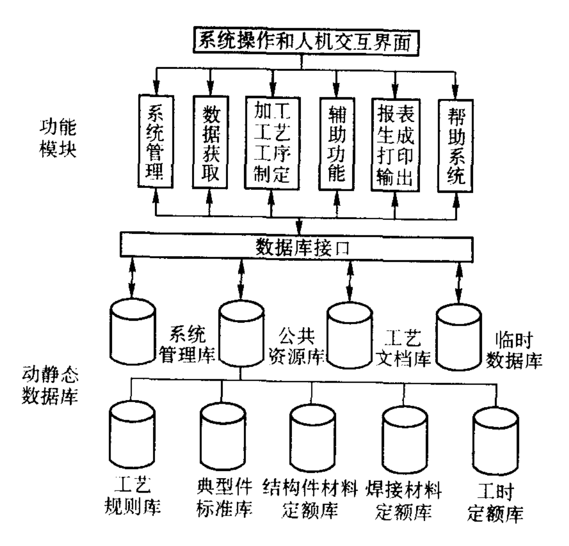


图 7.2-23 WCAPP 系统总体结构

系统的主操作界面使用 MDI 多文档界面,主窗体为应用程序的子窗体提供工作空间。主操作界面上包含各种菜单、工具条和下拉列表。系统管理模块实现权限管理、数据库管理和任务管理。权限管理给不同的用户赋予不同的权限,为数据库提供安全保证。数据库管理使有权限的用户能够对系统数据库进行有效的修改和维护,包括用户资料库、工艺规划库及典型件标准库等。任务管理用于进行工作任务的分工和合并管理。数据获取和分组模块读入产品设计明细表,提取相关信息生成焊接明细表,并根据总部件下属的第一级大部件进行分组。工艺工序制定模块实现焊接零部件准备工艺工序的制定,为本系统的核心,工时及材料定额的计算与汇总均以此模块制定的工序为依据。辅助功能模块完成工时、结构件材料及焊接材料的定额计算和汇总。表格生成输出模块从正式文档中提取数据生成相应的表格,并提供用户预览和打印功能,输出的表格直接用于指导生产和管理。

静动态数据库用于储存各种类型的信息。系统管理库存放与系统相关的资源,包括工作过程控制、用户和角色以及帮助等信息。工艺规则库存放有关制定工艺工序的规则及设备能力等信息。典型件标准库包括工序工时标准库、结构件材料定额标准库和焊缝明细标准库,分别存放典型件的工序工时、结构件材料定额和焊缝明细信息。结构件材料定额库存放与结构件材料定额计算有关的不同种类、不同形状的型材及板材的相关数据。焊接材料定额库存放与焊接材料定额计算有关的信息。工时定额库存放与工序工时定额计算有关的信息。工艺文档库存放各个已完成汇总的工作令的各个文档,包括工序工时信息、材料定额信息、焊缝明细等以及工作令汇总后的各个汇总表和生成报表后的各个数据报表以备查询、浏览及打印。临时数据库存放一个或多个正在制定中

的工作令的整体临时信息及一个零部件工艺工序制定、材料定额计算和工时定额计算过程中的各种临时信息。

系统的开发基于 Windows 2000 平台，开发工具采用 Visual Basic 6.0，数据库选择 ACCESS 2000。

6.3.3　焊接零部件加工工艺工序制定

焊接零部件的加工工艺工序制定模块首先从焊接明细表中提取每个焊接零部件的相关信息，并由 CAD 图纸得到该零部件的形状及特征参数，然后制定该零部件的加工工艺工序。

(1) 加工工艺工序制定方式

焊接结构件的零件由板材或型材加工而成。由板材加工而成的零件的结构特征可以从空间形状（如平面类、圆筒类等）、平面形状（弯曲成特殊的形状之前的板材外部形状）、内部形状（如各种孔和坡口等）几方面来描述。而型材可以分为工字钢、槽钢、圆钢及水煤气管等不同种类，型材零件的结构特征可从空间形状（如直线类、型材弯成圆角或直角、型材弯成圆弧等）、端头特征（如端头加工、斜切端头、管压头等）、表面特征（如各种孔和坡口等）几方面描述。由零件的结构特征可以确定零件的基本成形工序。但对于比较复杂的零件，则仅依靠其结构特征不足以完全确定其加工工序。例如，在零件形状特殊时，则下料前必须进行放样；如果一个板材零件的长度或（和）宽度超过一定的尺寸，需要两块板材拼接时，则需要进行焊接加工。此时还需归纳特殊的加工工艺。

部件是由型材零件、板材零件及其他标准零件装配焊接而成的，对部件的结构特征无法进行分类归纳，部件的工艺工序制定特点主要体现在部件的特殊加工工艺上（如二次切割、预热、减速机壳体或箱体等）。

在焊接零部件工艺工序的制定过程中，除了板材零件、型材零件及部件的各种特征参数外，企业的设备及设备能力也是一个不可忽视的因素。

根据上述分析，对一般的规则焊接零部件可以根据其尺寸、结构特征、所需的特殊加工方法及考虑设备加工能力后形成相应的工艺工序制定规则，据此进行加工工艺工序制定，但是一个产品的焊接零部件不全都是规则件，有个别零部件不能用规则的工艺工序制定方法来制定，必须由工艺人员进行手工制定；另一方面，对于国家标准件及企业的典型件，由于它们属于常用件，工艺工序固定，为了进一步提高系统运行的效率，实现工艺工序的规范化，系统将这些零部件的工艺工序、工时、结构件材料定额及焊缝明细等信息存储在标准库中，供工艺人员查询和在需要制定其工艺工序时直接提取使用。因此，焊接零部件的工艺工序制定可以通过以下三种方式来实现。

1) 从典型件标准库中直接提取。

2) 根据工艺工序规则制定工序：工艺工序规则由三部分组成，分别规定了部件、板材零件及型材零件的工艺工序制定规则。

3) 由用户手工制定新工艺：当一个焊接零部件不包含在标准库中，又不符合工艺工序制定规则时，则由工艺人员来手工填写工序工时、结构件材料定额及焊缝明细信息，系统只提供设计模板。

图 7.2-24 所示为焊接零部件加工工艺工序的制定流程。

(2) 规则零部件工艺工序制定

由钢板形成的零件首先要进行下料；如果板材零件需要钢板拼接或者板材零件在部件处需要和其他零件进行组装焊接，则要对其进行坡口加工；在下料和加工坡口过程中，由于板材可能产生变形，所以需要根据板材尺寸等信息确定是否需要进行校平，此外还要根据零件是否比标准板材超长或者超宽判别是否需要校平和对接；最后如果板材零件上有需要冲压或者钻孔形成的内部形状，则需要进行冲压和钻孔工序；如果零件是非平面空间形状的，则需要在冲压工序后对其进行卷制或者压制以形成特殊的空间形状。板材零件的工艺工序流程如图 7.2-25 所示。

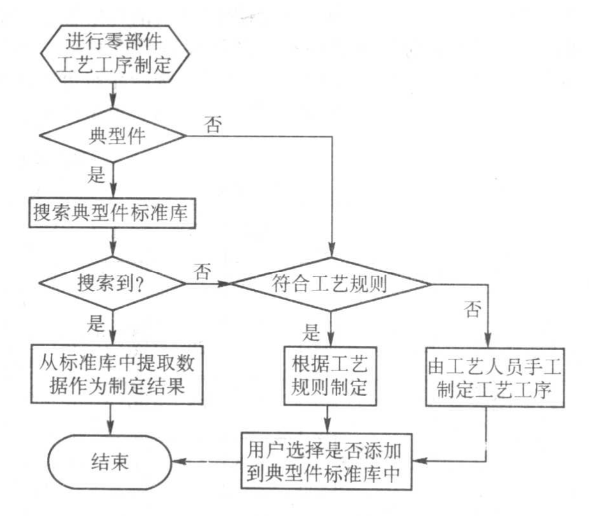


图 7.2-24　焊接零部件工艺工序制定流程

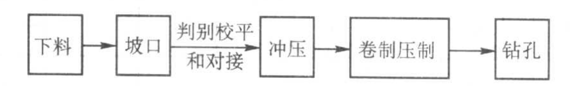


图 7.2-25　板材零件工艺工序流程

通过工艺工序规则制定板材零件的工艺工序时，用户需要根据图纸对板材零件的空间形状、平面形状、内部形状和特殊加工工艺加以判断，并在图 7.2-26 所示板材选择界面进行选择，系统会提示用户输入一些必要的参数。根据焊接明细表信息及用户输入的信息，系统通过工艺工序规则自动制定板材零件的工艺工序。例如，在图 7.2-26 中，用户选择了“直线轮廓”、“曲线轮廓”、“冲压”、“坡口不加工（气割坡口）”和“气割预热”，系统自动制定零件工艺工序为“预热、数控割、预热、手割、修磨、冲压、油漆”（以 R、G、R、G3、M、D、Y 符号表示）。

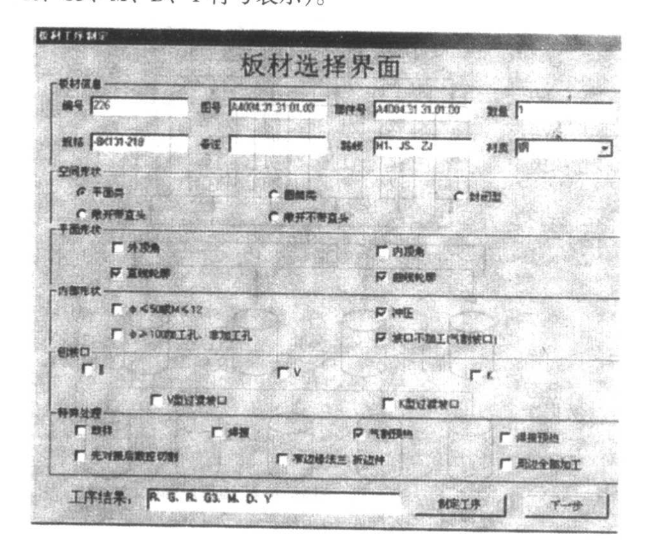


图 7.2-26　板材选择界面

焊缝信息不仅影响焊接零部件工艺工序的制定，而且影响焊接材料消耗定额的计算，因此焊缝信息的输入和处理至关重要。由于部件由零件装焊而成，在将零件装焊到部件前，通常需要进行坡口加工，焊缝长度与坡口长度一般情况下是相同的，因此我们将坡口长度的输入与焊缝长度加以对



应，以减少用户输入量；另外，对于一个装焊零件较多的部件，如果在制定部件工艺工序时输入焊缝信息，则会出现涉及焊缝太多，而且每条焊缝要参考零件的图纸，如此工艺人员很容易出错而导致最后的结果不正确，因此系统统一在制定零件的工艺工序时由用户输入所有属于本零件及属于零件上一级部件的焊缝信息，不仅焊缝输入信息明确，并且有些参数可以与坡口加工参数共用。焊缝信息输入界面如图 7.2-27 所示。

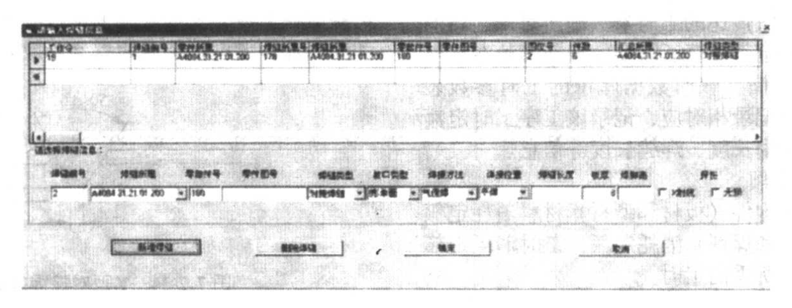


图 7.2-27　焊缝信息输入界面

型材零件的工艺工序流程如图 7.2-28 所示。下料主要采用锯断或者气割，端头加工则采用万能剪冲或压机，弯曲也采用压机。如果型材零件的形状为圆弧过渡，则首先要进行弯曲及下料，然后对端头进行统一加工。如果型材零件有内部孔则最后需进行钻孔。图 7.2-29 为型材零件的结构特征和特殊加工方法选择界面。

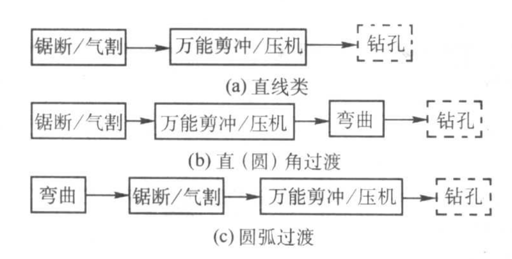


图 7.2-28　型材零件的工艺工序流程

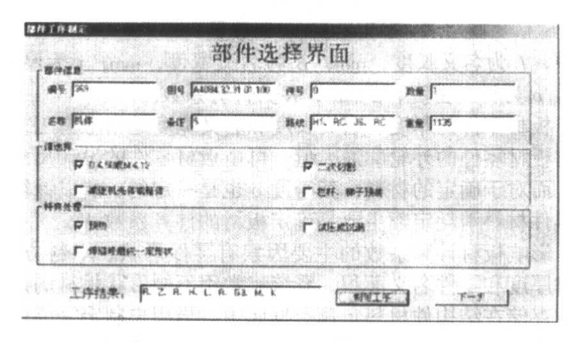


图 7.2-30　部件选择界面图

图 7.2-29　型材选择界面

图 7.2-30 为部件特征选择界面。部件的基本工艺工序为装配、修理（Z、L），如果零件之间需要焊接则在装配之后加焊接（H）工序。部件在由零件装配焊接后，还需要进行某些整体加工，如预热、加工孔、二次切割及修磨焊缝等，此时则在基本工序的基础上添加预热、钻孔和切割、修磨等工序。

(3) 典型件的工艺工序制定

存放在标准库中的国家标准件及企业典型件的图号由企业统一编制，如以 TZQ、TZB 等开头的零部件属于企业典型件，以 GB 等开头的属于国家标准件。在制定一个典型零部件的工序时，系统首先根据图号、件号等搜索标准库。若匹配到合适的图号，则从标准库直接提取该零部件的工序、工时、材料定额及焊缝明细信息。如果在标准库中搜索不到，则用户可选择根据工艺工序规则或者由用户手工制定该零部件的工艺工序（图 7.2-31）。典型件的工艺工序制定完毕后，用户可以选择是否将制定结果添加到标准库中。

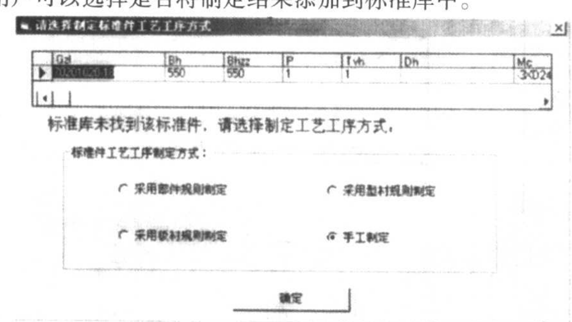


图 7.2-31　典型件制定方式选择界面

(4) 手工制定工艺工序

当焊接零部件既不属于典型件，又不能用工艺工序规则制定工艺工序时，系统提供用户直接输入工序、工时、材料定额和焊缝明细信息的模板（图 7.2-32）。



图 7.2-32　工序工时信息输入和修改界面

在每一个焊接零部件的工艺工序制定完成后，如果是零件则进行该零件的结构件材料定额计算；然后，如果零部件有焊缝，则焊接材料定额计算模块通过工艺工序制定模块传递的焊缝信息进行焊材定额计算；最后，工序工时定额计算模块通过工艺工序制定模块传递的工时参数确定每个工序的工时消耗定额。工序工时定额计算所需要的全部参数在零部件工艺工序制定过程中存储在临时数据库中的工时参数表中，每一个工序都有一行记录相对应，记录该工序工时定额计算所需的例如板厚、切割长度、焊缝长度等信息。

6.3.4　材料消耗和工时定额

材料消耗定额包括结构件（板材和型材）材料消耗定额和焊接材料（焊条、焊丝和焊剂）消耗定额，工时消耗定额则是对应于每个工艺工序所需的工时。

（1）结构件材料消耗定额

理论上板材零件材料消耗的计算公式为

$$W = LBt\rho K \times 数量$$

式中，L 为名义长度，mm；B 为名义宽度，mm；t 为厚度，mm；ρ 为材料密度，g/mm^3；K 为计算系数。

板材零件的厚度、名义长度和名义宽度是指考虑工艺余量时板材零件的外轮廓最大值，可由板材零件的设计尺寸确定，而对于确定的材料，其密度 ρ 也是一定的，所以计算板材零件材料消耗定额主要是确定板材的计算系数 K。

影响板材计算系数的主要因素有零件形状、下料方式、板材厚度和零件名义面积。系统将常用不同形状板材的计算系数存储在结构件材料定额数据库中。当用户制定完成板材零件的工艺工序后，在图 7.2-33 的界面上选择板材形状，并输入所需特征参数，系统自动搜索数据库得到板材计算系数 K，然后根据公式进行板材消耗定额计算。

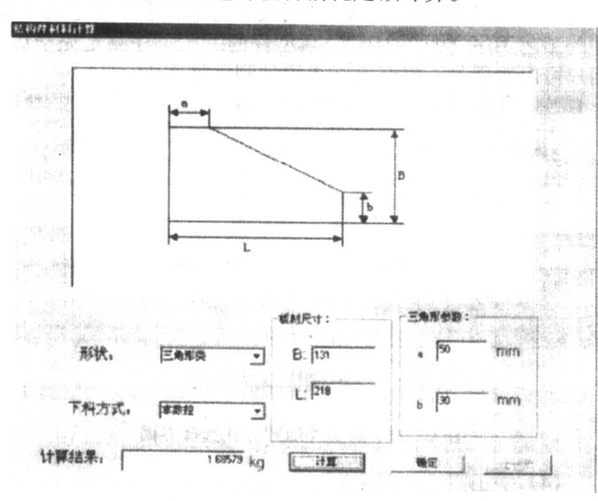


图 7.2-33　板材材料定额计算参数选择界面

型材零件的材料消耗计算公式为：

$$W = LS\rho K \times 数量$$

式中，L 为零件长度，mm；S 为零件截面积，mm^2；ρ 为材料密度，g/mm^3；K 为型材计算系数。根据实际生产情况及经验，型材计算系数可在 1.0～1.5 的范围选取。为了方便计算，将国家标准规定的型材的规格参数存储在系统的型材数据库中，包括单位长度质量（kg/m）等。

在结构件材料消耗定额计算完成后，系统将结果写入数据库，以供最后汇总统计使用。同时，系统提供了独立调用结构件材料消耗定额计算模块的功能。

（2）焊接材料消耗定额

焊接用材的计算主要和板厚、焊接方法、坡口类型和焊缝长度有关。对于图 7.2-34 所示的 Y 形对接焊缝，其单位长度熔敷金属的质量（kg/m）为

$$\frac{4\delta^2 + 11.7\delta + 16}{1\,000}$$

对于焊条手工焊，考虑到药皮的质量，根据经验，焊材消耗应在上述公式的基础上乘以一个系数 1.85；对于气保焊和埋弧焊，考虑损耗后根据经验取系数为 1.1。

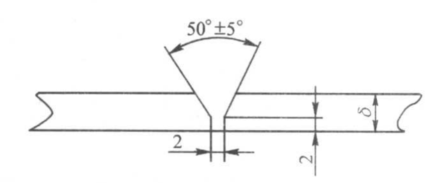


图 7.2-34　Y 型对接焊接坡口示意图

虽然可以由公式直接计算焊接材料消耗，但板厚并不是一个连续值，而是在一定范围内的离散值，因此我们可以把常用板厚的焊接材料消耗按不同的坡口类型列成不同的表。在计算时只需查表就可以很快得到焊接用材的信息。

本系统采用数据库查询和公式计算相结合的方式计算焊缝的焊材消耗。焊接材料消耗计算界面如图 7.2-35 所示。计算结果写入焊缝明细表并传回主模块，以供分类汇总使用。

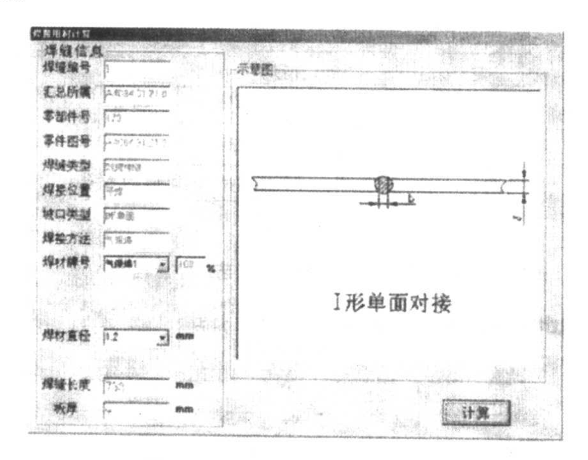


图 7.2-35　单条焊缝信息及示意图

除了可以由主程序调用焊接材料定额计算模块外，系统还允许用户独立启动该模块。

（3）工序工时消耗定额

工时消耗定额主要与工序类型、零部件的规格等特征和加工信息有关（如切割、焊缝长度等）。系统将根据不同工序、不同条件归纳整理的工时计算公式储存在数据库中。在进行工时计算时，系统根据工序信息查询确定计算公式，计算得到各工序的工时。对于焊接工时，如果焊接方法是气体保护焊或手工焊，而焊接位置不为平焊，则对应不同的焊接位置，系统对平焊工时进行修正。再根据有无探伤以及探伤方式的不同也乘以不同的系数，最后得到实际焊接工时。

工序工时定额模块也包括主程序调用和独立启动两种运行模式。工序工时计算界面如图 7.2-36 所示。系统将工序工时的计算结果写入工序工时定额表，以供最后汇总。

6.3.5　统计汇总与报表输出

统计汇总包括结构件材料消耗、焊接材料消耗和工时定额。结构件材料消耗定额的汇总按板材和型材分类进行；焊接材料和工时消耗定额的汇总以产品为单位和以部件为单位分别进行。以产品为单位的焊材汇总将所有焊缝消耗的焊材按照牌号和直径进行统计汇总，方便焊接材料的采购；工时

图 7.2-36　工序工时计算界面和结果

汇总按照工序代号进行统计汇总，以了解整个产品焊接零部件生产所需的时间，进行整个产品成本的估算。以部件为单位的焊材和工时汇总可以合理地将焊接材料及工时分配到每个工段，达到最优资源分配，从而提高生产管理效率，缩短生产周期。

WCAPP 系统的输出报表设计采用 VB6 自带的报表生成器 Data Report，对于格式复杂的报表需要对数据库进行预处理，所以打印模块分为两部分：数据打印报表生成模块和数据打印报表设计输出模块。输出报表预览打印选择界面如图 7.2-37 所示。

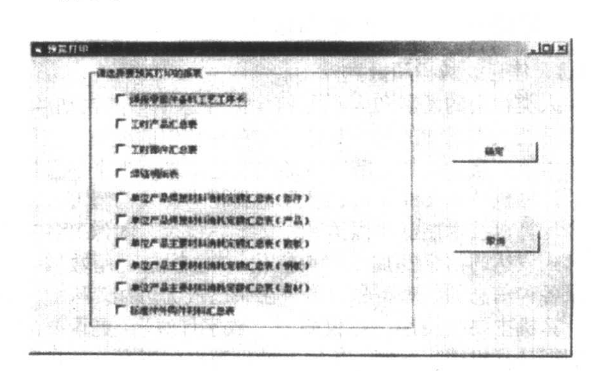


图 7.2-37　报表预览打印选择界面

除上述各项基本功能外，WCAPP 系统实现了有效的用户－角色－权限管理、流程管理和网络化运行。如系统可以把工艺制定任务指定给工艺工序制定人，工艺工序制定人可以查看自己的任务列表，并选择工作任务。

编写：朱志明（清华大学）

第 3 章　焊接数据库系统

1　焊接数据库系统的发展和应用

1.1　数据库技术的产生与应用

1.1.1　信息、数据和数据库

人类社会的发展和人类如何掌握和运用信息密切相关。信息是被人类感知的某一具体事物在头脑中的反映，它可以以语言、文字、图像、数字等形式表达出来。半个多世纪以来，计算机技术飞跃发展，已经达到相当普及的程度。由于当今计算机技术能够将以语音、文字、报表、图像等各种不同形式表达的信息都加以“数值化”，也就是说用数据作为记录各种信息的物理符号以表现出来已成为可能。因此，现在计算机主要的用途已不仅限于“数字计算”，更重要的是人们把计算机用作存储、传输、处理数据的工具。信息和数据是两个互相联系、互相依赖，但又有区别的概念。所有的信息都能以数据形式表现，而数据只有经过加工和抽象以后，具有使用价值时才能成为信息，但在本章中我们有时对这两个概念并不做严格的区分。

信息自古以来就无所不在，人们之所以近年来才把现在的社会称为“信息时代”，是因为只有计算机技术、网络技术发展到了前所未有的水平，数据的组织与管理、信息的利用与交流才成为一种不可或缺的社会文化。信息时代的一个重要任务就是尽快、尽好地把现实世界中的大量的、乃至海量的信息转化为计算机可以表示、存储、处理的数据，并加以广泛、深入地利用。数据库技术是组织、管理、利用大量数据最有效的方法。为此它作为计算机技术的重要组成部分，几十年来得到不断的发展，据不完全估计，数据库技术的应用已经超过全部计算机应用的 60%。

焊接技术的发展离不开数据库技术的应用。本章主要介绍数据库技术在焊接方面的应用情况，并具体举例说明焊接数据库的开发。为了便于了解数据库技术，本章还介绍了数据库技术的必要知识和该技术的最新发展。

1.1.2　数据库管理系统、管理信息系统

数据库的任务是利用计算机软硬件的资源，使大量的数据组织更合理、维护更方便、控制更严密、利用更有效。通常的组织方法是将一组相关的信息按行、列的形式排列成表格形成一个数据表，这个二维数据表中的每一行称为记录，每一列称为字段，如表 7.3-1 所示。将许多数据按照其相互关系表示为若干个表，数据库是多个表的集合，并且通过建立表与表之间的关系来定义数据库的结构，这就是关系型数据库。随着数据库技术的不断发展，现在“数据库”往往作为一个完整的“数据库系统”存在。数据库系统是指一个基于数据库的完整的计算机应用系统，其组成可以用图 7.3-1 表示。数据库系统最接近用户的一层称之为外在模式，就是数据库系统提供用户的外视图，是用户与系统之间的接口。数据库系统中的数据以物理的形式存储在计算机的存储器中，这些数据只有通过计算机的操作系统才能从存储器中取出或写入。为了对每一数据给以定义，然后加以操纵、控制、管理，需要一个运行在操作系统基础上的专门的系统软件，这就是数据库管理系统（Database Management System，DBMS）。因此，数据库系统首先需要计算机硬件和操作系统的支撑以及数据库管理系统软件，通常还需要使用其他的应用开发工具软件才能得到符合要求的数据库应用系统。此外，全面地讲数据库系统还应该包括系统的管理与维护人员。

表 7.3-1　焊工基本情况表

姓名	性别	年龄	文化程度	工作单位	钢印号	焊接持证项目	有效期至
张天	男	31	中专	分公司 A	3282	SMAW－Ⅱ－1G－12－F3J	2004/10/18
赵鹏	男	28	大专	分公司 A	4379	SMAW－Ⅰ－5G－5/60－F3J	2005/2/9
李小刚	男	45	职高	分公司 B	6028	GMAW－Ⅱ－5G－10－06/09	2004/12/15

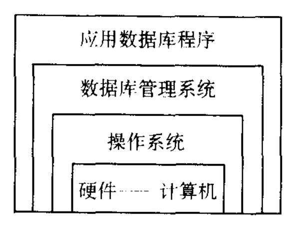


图 7.3-1　数据库系统的组成

DBMS 是数据库系统的核心部分，它对数据的各种属性进行定义，对大量的数据分门别类地进行控制，各种数据经过组织以后使之便于查询、更新。自从有了 DBMS 系统工具软件以后，只需要针对每一种具体的应用在 DBMS 基础上编制专门的程序就可以形成特定的应用数据库系统，于是数据库系统就得到了广泛的应用。20 世纪 70 年代曾经流行网状型和层次型数据库。到了 20 世纪 80 年代以后关系数据库逐步成熟，由于关系数据库具有坚实的理论基础，结构简单，操作方便，查询效率大大提高，现在数据库系统主要都是关系数据库管理系统。目前国内常用的 DBMS 有 Access、Visual Fox Pro、SQL Server、Oracle、DB2 等，前两种比较适合小型数据库管理系统，而后几种则属于大型数据库管理系统，适合在服务器上使用。这些关系数据库管理系统工具各有特点，用户可根据自己的需要选用。

管理信息系统（Management Information System，MIS）属于一种应用软件系统，它以数据库技术为基础，可以将各类信息转化为计算机能够组织的数据，并加以存储、管理和控制，乃至可以由存储的数据中提取更多的信息，例如归纳变化规律、预测发展趋势等。DBMS 为 MIS 提供了基本的设计方法、工具和环境。所以 MIS 系统可以认为是范围更广的各种数据库应用系统的统称。

1.2　数据库技术的新进展

随着计算机技术的发展，对数据处理的功能已经大大地超出一般关系数据库的范围。数据库技术的应用已经扩展到许多新的领域，新的应用必然提出新的要求，因此近年来出现了许多新型的数据库系统。由于数据库整体技术方面的发展，产生了如面向对象的数据库系统、分布式数据库系统、主动数据库系统、网络数据库等。而将数据库技术在体系结



构方面采用和集成了新的技术又出现了并行数据库系统、数据仓库和数据挖掘等。为了满足某些应用领域的特殊需要，在传统的数据库系统中引入一些特定的技术，增强系统对有关应用的支持能力，从而形成了工程数据库、统计数据库、空间数据库、知识库系统、多媒体数据库系统等（如图 7.3-2 所示）。

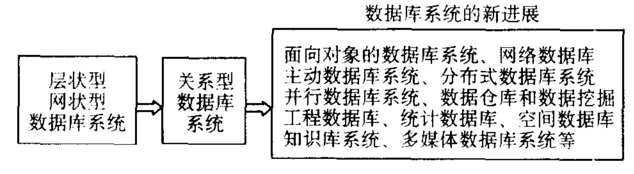


图 7.3-2 数据库系统技术的发展

本节分别介绍近年来在数据库方面发展较快、应用较广或者和焊接生产有关的几种数据库新技术，而不将数据库技术的新发展还是数据库应用的新领域严格分开。

1.2.1 网络数据库

一个数据库应用系统不可能限于一个用户，焊接虽然只是制造过程中的一个比较独立的工艺，但焊接数据库常常要在不同的工段、车间，甚至要在异地的工地上应用。为了解决多个用户的问题，30~40 年前数据库结构的主要形式是每一用户把自己的计算机终端仅仅作为主机的输入/输出设备，而他们共用的数据库应用系统和所有的数据资源以及处理都集中放在主机上，这就是所谓的“集中式结构”，这种结构通常硬件的投资较大，用户的应用需求如果有所改变，整个系统软硬件的升级相当困难。随着微机系统和局域网的广泛应用，集中式结构的数据库系统演化为“文件服务器结构”。由于作为客户端的微机能力足够强大，数据的各种应用处理都可以在客户端（工作站）上进行，完成后通过网络以文件形式提交服务器，这时服务器只提供文件的服务。文件服务器结构的缺点是数据的请求和更新都是以文件形式完成，所以网络负载很大，影响整个应用系统的性能，另外，DBMS 和数据文件分离，数据的一致性、完整性和安全性无法保证。

随着计算机网络技术的发展和广泛应用，20 世纪 80 年代后期，研究人员提出了客户机/服务器（Client/Server，C/S）体系结构，并逐渐取代了集中式体系结构和文件服务器体系结构。在客户机/服务器数据库结构中，常把客户机称作客户端或前台，把服务器称作后台服务器端或后台（见图 7.3-3）。客户机和服务器二者之间的功能划分可以有多种方案。首先要明确数据库管理系统中对数据的查询和处理功能主要是由客户机还是由服务器承担，其次还要明确数据是不是完全集中在服务器中，还是在客户机上也有功能完整的数据库管理系统，客户机通过对查询结果进行缓存来建立局部数据库，因而在客户机中实际上存放了一部分正在查询或更新的数据，当然在这种情况下要通过复杂的协议来保证最后的数据一致性。也就是说根据不同情况可以选择客户机是“胖”的或是“瘦”的。如果在客户机上要配置多种软件，包括操作系统、数据库管理系统以及网络通讯软件等，客户机的负担可能过重。三层客户/服务器结构就是从客户机和原来的服务器中各划出一部分工作交给应用服务器（见图 7.3-4）。这时客户机主要负责用户和应用服务器的交互。应用服务器负责接收客户机的请求，并将它转化为对数据库请求命令，进而交付数据库服务器去处理。数据库服务器处理请求后将结果返回给应用服务器，最终到达客户端。

上面提到的为了适应多个用户能够同时访问数据库的需要，客户端（前台）和服务器端（后台）功能分配的各种结构，各有自己的适应范围，应该根据实际应用的需求来确定，

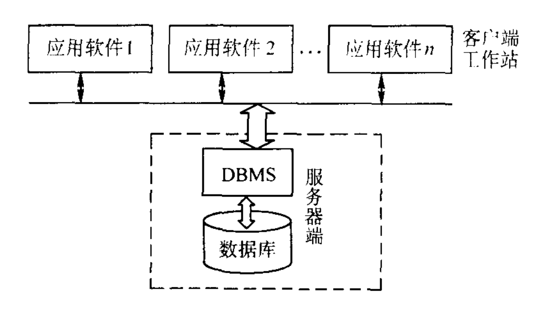


图 7.3-3 客户/服务器体系结构

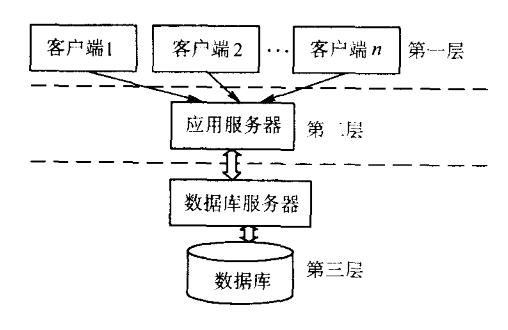


图 7.3-4 三层结构的客户/服务器体系结构

特别是要考虑到已有数据库系统的结构，还要考虑到实际应用可能的发展。

十多年来，因特网（Internet）已成为随处可见的技术，它提供了各种各样的信息服务，Web 是互联网为用户提供的交互和共享信息的一种应用。Web 是 World Wide Web 的简称，或称万维网、www、3W。万维网是由许许多多网站组成的非常庞大的信息网，它提供信息的基础是通过超文本结构为用户在 Web 浏览器页面上获得文本、图形、声音、视频等各种信息。这些信息分别存放在各个网站的服务器上，用户可以利用超链接的方法去浏览不同网页上的信息。由于 Web 的信息是一种结构松散的数据，没有严格的数据结构，大量的数据在管理、查询上很不方便，而传统的数据库中的数据具有严格的结构和规范化的存取方式，因此仍然是管理和查询大量数据的最好方式，于是基于 Web 的数据库系统受到了各个方面的重视，从而以惊人的速度迅速发展。

在基于 Web 的数据库系统中，用户用以浏览信息的计算机相当于 C/S 结构中的客户端，这时在客户端一般只安装 Web 浏览器（Browser）。因此这种 Web 数据库也称为浏览器/服务器（Browser/Server，B/S）结构的数据库。由于 Web 网站管理的需要，在数据库服务器和客户端之间要设立一个 Web 服务器作为中间层，在中间层服务器上也包含了系统的应用程序。因此，Web 数据库是一种典型的三层客户/服务器结构（见图 7.3-5）。

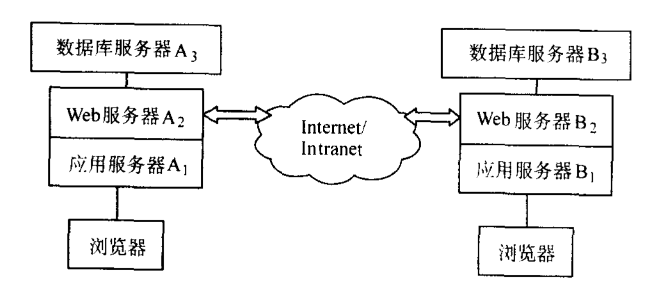


图 7.3-5 Web 数据库系统结构示意图

Web 数据库中所包含的技术既有 Web 网页开发技术又具有许多传统数据库方面的技术，同时为了实现在网络环境下各种数据库中信息的共享，使二者无缝有机结合，也必然



促进了一些新技术的发展，下面对相关的主要技术作一简要的介绍。

(1) 动态网页开发技术

Web是基于HTML（Hypertext Marked Language，超文本标记语言）和HTTP（Hypertext Transfer Protocol，超文本传输协议）并通过超链接（Hyper Link）方式浏览Internet上的信息的。早期的Web完全是静态的，“静态”指的是网站的网页内容“固定不变”，若要更新网页的内容只有通过手动逐一修改HTML文件才能实现。对于Web数据库来说，用户必须通过Web服务器和数据库进行交互，也就是说网页应该根据用户的请求而改变和响应，自动生成新的网页，其内容主要是根据数据库中的数据来动态生成的，而无需手动更新HTML文件。这种网页被称为动态网页。这时用户的请求是通过在Web服务器上运行脚本程序，浏览器得到的是由脚本程序动态生成的符合用户需要的HTML文件。

各个软件公司纷纷提出了生成动态网页的技术，近来流行的主要有ASP、JSP、PHP，还有微软公司新推出的ASP.NET等。ASP是Active Server Pages（动态服务器网页）的缩写，是微软公司推出的嵌入了服务器端脚本的Web应用程序开发技术。ASP既不是一种语言，也不是一种开发工具，而是一个服务器端的脚本环境，其主要功能是为生成动态、交互，而且高效的Web服务器应用程序提供一种功能强大的技术。ASP的主要特性是能够把脚本、HTML等和强大的Web数据库访问功能结合在一起，形成一个能在服务器上运行的应用程序，按用户要求专门制作的HTML页面送给客户端浏览器。ASP属于“开放技术框架”，它不仅支持微软的脚本语言VBScript和JScript，甚至还可以支持非微软的其他脚本语言。ASP可以与ADO（ActiveX Data Object，ActiveX数据对象）结合和数据库相连接，因而得到了广泛的应用。JSP（Java Server Pages）是Sun公司基于Java Serverlet的、为实现动态网页制作的技术。PHP（Hypertext Preprocessor超文本预处理器）是一种开放源代码的、跨操作系统平台的服务器端的嵌入式脚本语言，它能够快速地写出动态网页，并且支持目前绝大多数数据库。ASP，JSP，PHP三者各有所长，也都有着各自的不足，因此都有相当数量的支持者，在开发动态页面时可选择一种适合自己的语言。

(2) 网上数据库访问技术

由于数据库可能存放在不同的服务器上，Web数据库既要解决页面与数据库的连接，还需要和多个不同的DBMS中的数据库相连接。为了解决数据库之间的互访问题，国际标准化组织（ISO）曾批准过一个调用级接口规范（CLI，Call-Level Interface，调用层接口），微软公司同时发布了基于这个规范的软件开发工具集，称为开放数据库互连（Open Database Connectivity，ODBC），ODBC实际上已成为数据库访问技术的标准之一。ODBC技术为应用程序提供了一套CLI函数，使应用程序具有良好的互用性和可移植性。ODBC还有一组针对不同数据源的驱动程序，从而具备了同时访问多种数据库系统的能力。在Windows操作系统上，ODBC的驱动程序管理器是一个动态链接库（Dynamic Link Library，DLL），它可以连接Foxpro、SQL Server、Oracle、Sybase、DB2等数据库。此后，微软公司又开发了新的数据编程接口OLE DB（Object Linkingand Embedding DataBase，对象链接与嵌入式数据库），扩展了ODBC提供的功能，它可以访问关系型数据库，也可以是非关系型的数据源。由于无论OLE DB或是ODBC都无法在前面提到的ASP中使用，微软公司又设计了可以在ASP中使用的数据访问接口ADO（ActiveX Data Object）。ODBC、OLE DB、ADO是微软公司提供的Microsoft Data Access系列组件的三个核心部分，它们在访问数据库时，提供了一种层次型的结构，如图7.3-6所示。图中每一个层次都可以单独调用，所以在Web数据库中常常直接使用ADO。

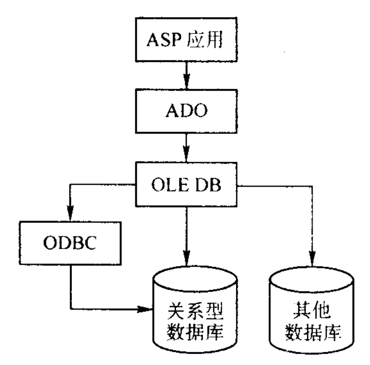


图7.3-6　Microsoft Data Access组件

对于建立焊接数据库来说，如何选择数据库系统的结构需要根据用户已有的基础、当前的需求、前景的规划、预期资金和人力的投入等因素，认真规划系统软硬件的分布和功能分配来确定。在满足需求的前提下，易于开发、使用、管理、维护往往是最需要考虑的因素。

1.2.2　面向对象数据库及对象-关系数据库

尽管关系数据库具有结构成熟、使用方便、运行速度快等优点，但是由于关系数据库模式比较简单，只能满足一般事务处理要求，而对复杂事务处理应用很难完全适应。因此，需要一种能适应各种不同应用要求的更通用、更复杂的数据模型。近20年来才发展起来的面向对象方法，由于具有较好反映客观世界的能力，具有抽象性与普遍性，目前已成为计算机程序分析和设计时广泛使用的一种方法。就数据模型来说，面向对象数据模型是具有较强表示能力的模型，能满足多种应用要求。以面向对象模型为核心的数据库管理系统统称之为面向对象数据库管理系统（Object Oriented Database Management System，OODBMS）。OODBMS是把面向对象程序设计方法与数据库技术结合而产生的，它是可以用以支持非传统数据库应用领域的新一代数据库系统，或者可以简单地将面向对象数据库管理系统表达为“面向对象的概念与方法+具有数据库管理系统的功能”。

面向对象数据库的应用主要集中于系统软件和数据密集、复杂的应用软件系统，如计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助制造（CAM）、计算机集成制造系统（CIMS）等方面。一些数据库方面的专家在1989年、1990年先后分别发表了“面向对象数据库宣言”和“第三代数据库系统宣言”，他们对OODBMS提出了必须满足的基本条件。为了使面向对象数据库产品标准化，计算机厂商成立了ODMG（Object Data Management Group）国际组织，并于1993年形成了工业化的面向对象数据库标准ODMG—93，1997年又公布了第二个标准ODMG—97，或称ODMG2.0，其内容比较广泛，而且可以与C++、Smalltalk、Java衔接。

经历了近20年的发展，有些公司已陆续推出了商业化的OODBMS软件产品。但是，由于目前面向对象数据库还缺乏坚实的理论支持，不能与关系数据库系统完全兼容等原因，凡是独立的不依附于其他软件系统的OODBMS，它们的数据库管理功能都不很完整，即使是市场上流行的OODBMS几种产品，其功能也有待进一步完善。为此，有一些数据库学者提出不要另行研制面向对象数据库，而是在充分利用传统关系数据库管理系统的基础上，增加面向对象的功能，使之能够满足“第三代数据库宣言”中提出的面向对象数据库系统应该满足的条件，这种数据库管理系统称为对象-关系数据库（ORDBMS）。对象-关系数据库系统兼有关系数据库系统和面向对象数据库系统的优点，既支持复合数据类型，查询语言功能强大，又具有高保护性。尽管ORDBMS在面向



对象功能上的扩充只限于几个主要的方面，对最终用户来说就感到使用对象-关系数据库系统开发的数据库应用系统功能强大、操作方便。由于对象-关系数据库系统具有明显的优点，许多软件公司纷纷推出了具有对象特点的关系数据库产品，如IBM公司的DB2/V2；Oracle公司的Oracle 9i产品；Sybase公司的Adaptive Server等。

1.2.3 工程数据库

工程数据库系统（engineering database system）广义来说是适用于CAD/CAM、计算机集成制造（CIMS）、地理信息处理和军事指挥、制控、通信等工程应用领域的数据库系统，和我们直接相关的是能够为工程设计与制造、生产管理与经营决策提供有效服务的数据库系统。由于这些方面的数据类型多、结构复杂、相互联系紧密、数据存储量大等特点，工程数据库系统与传统数据库系统有很大不同。其主要特点如下：

1）复杂对象、图形数据的表达和处理；
2）复杂多样的工程数据的存储和集成管理；
3）变长数据实体的处理；
4）动态模式的修改和扩展；
5）可扩展的数据类型；
6）数据库版本管理；
7）长事务及并发控制。

下面就其中几个方面做进一步的说明。

（1）复杂多样的工程数据的表达和处理

在数据类型方面，工程数据库中除了要有通常事务处理时的一般数据类型外，还要包括向量、矩阵、集合、几何图形、复杂的数学公式等；在数据结构方面，工程数据库要能反映工程实体中零部件之间的关系，例如一个产品要由许多部件、子部件、零件组成，它们相互形成树状结构，工程数据库要能存储和处理这种树状结构以及零部件间的继承性等关系；同时工程数据往往是"变长"的，例如规格说明、设计准则、附注等，它们有长有短无法预计，工程数据库管理系统必须能够支持这类变长的数据。

（2）支持长事务的处理能力

在工程应用中，有些设计会持续很长时间，有些大的设计可能还要分成若干子设计完成。在传统的数据库中，为了保证数据库中的数据一致性，在这种长事务的处理没有结束前，要封锁住所有该事务所用到的数据不释放，因而会占用许多资源，从而必然影响整个系统的并发使用。解决这个问题的一种办法是取出数据库被封锁部分的副本，把这些数据传送到设计者的专用工作区，建立专用的数据库，并在主数据库中给对应的数据做出标志，这样就不影响其他应用程序对主数据库中的数据进行存取。当设计者在专用数据库中的数据修改完成后，再送回主数据库，以保持数据的一致性。考虑到长事务可以持续很长的时间，其间系统硬件可能有多次关闭和重新启动，工程数据库的事务管理机制也和传统数据库有所不同，它的日志里不但记载了数据的变化，而且还能记录数据的使用历史情况。

（3）具有支持数据库版本管理能力

因为工程设计过程不可能一次设计就能得到满意的方案，往往需要反复试探和修改，因此保留各设计过程是很有必要的。反映在数据库系统上，就是要具有多版本的管理能力。每一个设计方案可以是一个版本。当一个工程对象完成以后，经少量改动可能派生出其他不同的工程对象，这也可以看作是数据库的不同版本。对于数据库的不同版本，如果分别一一存储，则将浪费大量的存储空间，而且隔断了不同版本之间的内在联系，这就涉及到版本的继承机制问题。传统数据库中几乎不存在版本管理问题，而对于工程数据库则是非常重要的。在工程数据库中有许多版本管理方法，通常采用三层次体系的版本管理，即将版本划分为三种状态：发布版本（released version）、冻结版本（frozen version）和工作版本（working version）。发布版本是指已经成熟的版本，表明设计已经完成，所以发布版本常驻在公共数据库中，可供任何设计人员共享使用，而且通常不允许更新和删除。冻结版本是指设计已经达到某些要求，可以提供给同组设计人员共享的版本，存放在项目库中，供同组人员集成测试。冻结版本只能由该版本的产生者更新和删除。工作版本是指正处于设计阶段的版本，存放在设计者个人的私有数据库中。由于这是一个还没有完成的版本，不能提供其他设计人员访问。各种版本中的数据如何保存，如何查看等也有一些技术问题。

要开发能满足工程设计各种要求的全新的工程数据库管理系统，难度和工作量都很大，已有的工程数据库管理系统软件多局限于某些专用领域，目前还没有真正商品化的通用的工程数据库管理系统。

如果掌握现有的DBMS的源程序，则可在原有的数据库管理系统的模型上从底层扩充复杂的数据类型和表结构，增加版本管理和图形数据管理等功能，以适合工程设计的应用。如果得不到现有的DBMS的源程序，也可以充分利用现有的DBMS的核心功能模块，仅仅开发附加工程应用界面以形成工程数据库管理系统，这样实现起来比较容易，但这样自然会受到所选底层DBMS功能的约束和限制，缺少灵活性。更为简便的方法是建立专业的文件管理器，以此作为工程应用的基础，把各种工程数据都以文件形式存放在这个文件管理器中，而选用一种现有的DBMS作为一项应用来管理这些文件。这样虽然缺少工程数据库的整体性质、增加了界面的转换、整个系统的效率下降，但是开发工作量小，易于实现。现在国内有些CAPP系统就是这样建立的。

对焊接工程相关的数据库来说，并不需要复杂的通用工程数据库管理系统，利用ODBC、OLE DB等数据库系统应用程序接口规范工具，通过对现有的DBMS进行二次开发，以实现满足焊接工程应用的数据库，是比较方便的方法。为了适应数据库功能的需要，一些CAD软件本身就提供了访问外部数据库的功能，例如在AutoCAD 2000中就增加了数据库连接管理器（dbConnect Manager），为用户管理和组织数据库连接提供了一个中心控制机构，从而实现数据库与AutoCAD图形对象的链接。这是值得注意的一个方向。

1.2.4 数据仓库及数据挖掘

自数据库技术广泛应用的30多年来，在各种类型的数据库中逐步积累了大量的数据。人们显然不满足于仅仅是存储和处理数据，而且要求能够处理数据库所涉及领域相关的事物，这就是通常称之为"联机事务处理（Online Transaction Processing，OLTP）"。进一步人们还要求从数据库的大量数据中提取更多的信息，以便于进行决策，于是在20世纪70年代提出了决策支持系统（Decision - making Support System，DSS）的概念。DSS应用信息技术为管理人员在决策时提供支持。决策支持系统和专家系统技术几乎是同时兴起，它们都是起到辅助决策的作用，但辅助决策的方式不同，它们沿着各自的道路发展。决策支持系统辅助决策的方式主要是属于基于数据库的定量分析。传统的DSS是建立在传统的OLTP数据库体系结构之上的。DSS系统根据决策者的需要，由系统中的数学模型、数据处理模型以及图形、报表等形象模型得出决策的方案和方案的可行性分析结果。

随着DSS系统不断发展，人们希望能够综合利用所有的数据和信息，提供多方面、深层次的决策，但是，这时DSS系统为了进一步对大量数据进行分析处理的需要，要访问大量历史性、汇总性和计算性的数据，决策分析的内容和采用的技术也日趋复杂，传统的操作型事务处理数据库和OLTP



技术已不能满足这些要求，为此按决策的需要另建分析型数据库系统是合理的选择。1992年，W.H.Inmon提出了数据仓库的概念，可以认为数据仓库是以决策支持DSS为目标的一种面向主题的、集成的数据库，它利用联机分析处理（On-line Analysis Processing，OLAP）技术，为管理人员提供决策分析。20世纪90年代以来数据仓库已成为计算机应用领域的一个技术热点。

数据仓库的数据源通常包括企业内部信息和外部信息。企业内部信息包括企业操作型数据库系统中的各种数据和办公自动化系统中的各类文档数据；外部信息则包括各类法律法规、市场信息以及各类外部统计数据和文档等。为了实现从操作型数据向数据仓库数据的转移，通常要经过提取、转换、净化、加载、汇总等步骤。因为并非所有的内部和外部信息都对决策分析有用，因此需要决定从源数据库中提取哪些文件、表或字段，而这些数据往往来自多种数据源，还可能存在在不同的硬件平台上、使用不同的操作系统，因而必须要把这些数据转化成公用的格式。由于数据是来自各种各样的数据库，几乎不可避免存在某些错误，例如，来自不同数据源的数据不一致甚至冲突等等，为了保证高质量的信息，有必要对进入数据仓库的数据进行全面检查，并使它们尽可能没有差错，这就是“数据净化”过程。只有经过以上步骤才能把数据转移到数据仓库的计算机上并创建汇总数据。

构建企业级的数据仓库涉及范围和投入成本常常是巨大的，而且实施周期长、见效慢，由此提出了一种“自下而上”地建设数据仓库的方法，就是说先从构建部门级的数据仓库着手，通常把这种为部门级提供决策支持的数据仓库称之为“数据集市”（Data Mart），以后再用几个数据集市组成一个完整的数据仓库。所以可以认为数据集市是针对部门级应用的数据仓库解决方案，其特点是：规模小、面向特定的应用、面向部门、快速实现、投资规模小、易使用、支持异种机平台等。

联机分析处理（OLAP）是专门为特殊的数据存储和分析而设计的一项新兴的软件技术，它可以使管理分析人员从多种角度处理大量的、多种结构的并经过转换的原始数据，为用户提供便于理解的、直观易懂的信息，例如，给出饼图、曲线图、直方图等形式。OLAP的核心是“维”的概念，这里“维”就是指人们观察数据的特定角度，例如，可以按照需要分析主题的要求，将数据库中的大量数据定义出空间维、时间维、部门维、人员维等。在OLAP中，可以对4维、5维甚至更多的维进行度量分析，因此也可以说OLAP是多维分析工具的集合。例如在对焊接生产质量分析时，可以利用OLAP技术从车间、工段等角度进行分析，也可以从日、周、月等角度进行分析等等。

数据仓库使得操作型数据与分析型数据分离，OLAP虽然也提供了从多角度观察数据的功能，但仍然不能满足更深层数据分析的需要。数据挖掘（Data Mining，DM）就是从大量数据中（最好是从数据仓库中）提取有用信息和知识的一种分析型工具，这些知识往往是事先未知的，而又隐含于大量数据之中的信息。OLAP是由用户提出问题或假设后，从大量数据中提取该问题的详细信息，还可以以可视化的方式呈现给用户。数据挖掘则无需用户事先提出确切的问题，就可以自动地在数据仓库的数据中开采隐藏的模式，并进而发现未知的事实。数据挖掘和数据库知识发现（Knowledge Discovery in Database，KDD）作为学术领域有很大的重合度，在人工智能领域习惯称KDD，而在数据库领域习惯称数据挖掘，部分学者认为二者是等价概念，但也有人把数据挖掘视为KDD过程的一个步骤，如图7.3-7所示。数据挖掘的任务在于找出隐藏在数据中的规律，如关联规则、序列模式、分类规则、聚类规则等。数据挖掘中用到的技术包括人工神经网络、遗传算法、决策树等。

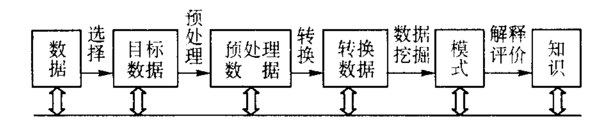


图7.3-7 数据仓库和知识发现

无论建造数据仓库，还是采用OLAP和数据挖掘方法中的某些技术，近年来IBM、Microsoft、Oracle、Sybase等公司都提供了一些产品或工具，它们在国内外得到了应用。

在焊接工程领域，华南理工大学采用数据集市和数据挖掘技术建立的自动化弧焊过程在线质量监测与管理平台就是一个实例。

1.3 焊接数据库系统的发展

焊接数据库系统是数据库技术在焊接领域应用的一个重要分支，其组成一般包括焊接数据库、数据库管理系统、应用程序三个主要部分。焊接数据库用于存储数据与信息，数据库管理系统为用户提供管理数据库的平台，而应用程序则为用户提供应用数据库的界面。焊接数据库系统将焊接领域内的各种数据、信息、资料和文件等有规律地组织和保存起来，使其可以快速地查阅、方便地使用。由于焊接生产的复杂性，焊接数据库系统极大地提高了焊接工作者的工作效率和利用有关数据和信息的准确率，因此，焊接数据库系统在焊接领域内的应用越来越广泛。

从20世纪70年代末开始，日本、英国、美国、德国等工业发达国家，相继开始了焊接数据库系统的研究工作，并开发出了各种不同类型与不同用途的焊接数据库系统。

1976年，日本成立了专门的焊接数据库委员会，在1986年召开的第五次会议上，提出了建立试验钢材、焊接方法、坡口形状、焊接材料、焊接条件、焊缝金属化学成分、预热和后热、热处理以及焊接接头性能数据库的目标和方向。

1984年，美国专门成立了材料数据库网，在世界范围内收集有关材料的数据，包括力学性能、物理性能、化学成分及电化学腐蚀性能等。

1987年，德国焊接协会开始建立焊接信息系统，其中包括两个数据库系统：焊接文献数据库及焊接记录数据库。

我国焊接数据库系统的研究与开发工作始于20世纪80年代中后期，甘肃工业大学、哈尔滨焊接研究所、哈尔滨工业大学、清华大学、天津大学等科研院所与一些大型企业合作或独立开发了多个焊接数据库系统。

随着计算机技术和数据库技术的发展，焊接数据库系统也得到飞速的发展，开发语言由原来的DbaseⅡ经历了DbaseⅢ或FOXBASE直至今日的FoxPro、Visual FoxPro、Delphi、Power Builder、Visual Basic、Visual C、C#.NET等，编程技术由一般的编程发展到窗口编程、菜单编程及可视化编程，应用环境则由原来的DOS、Windows 3.x发展为今天的Windows 9x、Windows NT或Windows 2000、Windows XP等。焊接数据库系统不仅在功能上得到了很大的提高，而且性能逐步完善，同时内容和范围也在不断扩大，由最初的材料原始数据、一般的焊接性试验结果扩展到实际的生产记录，如焊接工艺评定、焊接工艺规程、焊工培训与技术档案以及焊接生产计划和质量信息管理等各个焊接生产环节，并逐步向商品化迈进。

然而，目前的焊接工程数据库大都是基于小型数据库管理系统，远远不能满足当前企业网络化、信息化发展的需要。由于网络技术的发展，数据库已经从单机模式发展为

Client/Server（客户机/服务器）模式，直到现在的 Browser/Server（浏览器/服务器）模式，网络已成为信息产业发展的主流，焊接技术与网络的关系也越来越密切，因此开发基于网络的焊接数据库系统具有非常实用的价值，研究者也开始进行焊接数据库的网络化研究与开发。

数据库技术也在不断前进，在原有关系数据库基础上出现了面向对象的数据库系统、多媒体数据库、分布式数据库等新型的数据库系统，焊接数据库也必然向这方面发展。

1.4　焊接数据库系统的典型应用

目前，数据库技术已经渗透到焊接领域的各个方面，从原材料、焊接试验、焊接工艺，直至焊接生产，包括焊接工艺管理数据库、焊接材料数据库、焊工培训和档案管理数据库、焊接生产计划与质量管理数据库、焊接标准和知识咨询数据库等。

1.4.1　焊接工艺管理数据库系统

焊接工艺评定在焊接结构的生产制造过程中占有重要的地位，对于锅炉、压力容器、压力管道、船舶、核电设施等重要的焊接结构，在进行生产制造前，必须进行严格的焊接工艺评定试验，确定与被焊材料及板厚等结构条件相匹配的焊接工艺规范及焊接材料，从而获得满足使用要求的焊接接头性能，只有评定合格的焊接工艺才能用于产品的焊接生产。随着新材料的不断推出以及对焊接技术的要求日益提高，焊接工艺评定的试验越来越多，且越来越全面化。

由于影响焊接接头性能的工艺参数众多，每种重要参数的改变，如预热温度、热处理温度、焊接线能量超出规定的范围，都要重新进行焊接工艺评定试验，因此，在每一个焊接结构制造企业，随着焊接结构制造量的增加，焊接工艺评定的数量也在不断增加。由于焊接工艺评定报告数量的增加，在焊接技术人员进行产品的焊接工艺规程设计时，寻找一个合格的焊接工艺评定报告要花费大量的时间，判断是否需要重新进行焊接工艺评定试验的工作也日趋复杂，为此，国内外一些研究部门和企业将现有的合格焊接工艺评定报告建成数据库，从而使焊接技术人员可以利用计算机对比查询合格的焊接工艺评定报告，并输出对应的焊接工艺卡，减轻从事焊接工艺评定数据管理人员的工作量，提高了工作、生产效率，实现了焊接工艺评定数据的科学化、智能化管理。

表 7.3-2 所示为有关的焊接工艺管理数据库系统。它们一般具有焊接工艺评定报告查询、焊接工艺编制和管理以及焊接工艺评定重要因素、次要因素的判别功能。

表 7.3-2　焊接工艺管理数据库系统

软件名称	主要功能	开发单位
焊接工艺文件管理数据库系统	基于 Client/Server 模式；焊接工艺评定、焊接工艺规程管理，并能够根据标准完成工艺评定必要性判断	哈尔滨工业大学 大庆油田股份有限公司
钢制压力容器焊接工艺评定数据库系统	对焊接工艺指导书、焊接工艺评定报告、常用焊条、中外焊条对照、压力容器用钢及焊工资料等压力容器焊接工艺评定中所涉及的内容进行存储、更新、增减、打印输出等操作，并能根据焊接方法、母材及厚度等进行单条件或组合条件的查询，可计算出每条焊缝的生产成本	西安石油大学 西安长庆科技工程有限公司
压力容器弧焊工艺参数推定系统	对母材库、焊材库和焊接工艺库进行修改、添加、删除、显示、查询、打印等；建立了焊接方法选择，焊材选择和坡口选择的计算机推定模型，实现在给定条件下焊接工艺参数的计算机自动推定	合肥工业大学
焊接工艺评定管理数据库系统	采用 B/S、C/S 模式相结合的方法，实现了数据库的网络化，可以完成焊接工艺评定必要性判断、焊接工艺评定报告和焊接工艺卡的数据库管理，可以实现焊接工艺卡的自动生成及焊工档案管理	武汉理工大学
焊接工艺数据库及焊接工艺评定系统	各种标准数据库和某公司的经验数据库的数据添加与更新。焊接工艺规程、焊接工艺评定报告、焊接工艺评定指导书、焊接记录的查询、维护和打印等；根据焊接工艺评定报告部分智能化地生成焊接工艺规程	上海工程技术大学
焊接工艺文件管理与编制系统	焊接工艺设计书、焊接工艺评定书、焊接工艺规程管理	哈尔滨工业大学 上海宝钢冶金建设公司
焊接工艺规程数据库系统（WPSDBS）	焊接工艺规程的输入、存储、查询、打印	哈尔滨工业大学 哈尔滨锅炉责任有限公司
焊接工艺评定计算机管理系统	焊接工艺评定报告的制定、查询和浏览	太原重机学院
焊接工艺评定管理	焊接工艺评定报告管理	兰州石油化工机器厂
焊接工艺评定报告数据库	焊接工艺评定报告管理	北京燕山建筑安装工程公司
焊接工艺评定管理	焊接工艺评定报告管理	天津大学 兰州石油化工机械厂
焊接工艺评定数据库	焊接工艺评定报告管理	太原重机厂



续表 7.3-2

软件名称	主要功能	开发单位
焊接数据库及弧焊工艺评定系统	母材数据库、焊接材料数据库及工艺评定库查询、检索，计算确定焊接工艺规范及焊接接头性能	合肥工业大学
压力容器焊接工艺卡的计算机管理系统	焊接工艺评定的查询、焊接工艺卡的编制、焊接工艺评定项目库的维护，以及焊接工艺评定重要因素、次要因素的判别系统	南京化工大学 江苏省锅炉压力容器安全检测中心
智能化焊接工艺 CAD 数据库	焊接工艺规程及焊接工艺评定管理	上海交通大学 上海锅炉厂
焊接工艺管理	WPS 管理与编制	唐山锅炉厂
焊接工艺及信息处理	WPS 编制与管理	金洲重型机器厂
焊接工艺设计 CAPP 系统	焊接工艺委托单、设计书、评定书、工艺规程、施工任务书设计与管理，焊接坡口图形设计与管理	哈尔滨工业大学 大庆油建二公司
焊接工艺预设计软件	焊接性预测、设计书、评定书、工艺规程设计与管理，钢制压力容器焊接工艺评定标准咨询	哈尔滨工业大学 大庆油建公司
WELDSPEC	根据英国标准 BS4870，可按工艺评定号、母材类别、接头型式、厚度范围、焊接方法及焊接位置进行焊接工艺评定记录查询	TWI（英国）
WELDSPEC PLUS	WPS/PQR 管理（依据 ASME 第 IX 篇）	爱迪生焊接研究所（美国）
XWELD	焊接工艺管理	TWI（英国）
PROFILE	焊接工艺管理	OGL（英国）
WELDPROC	焊接工艺管理、焊工记录管理	Logical management（英国）
QWEST	焊接工艺管理、焊工记录管理	Renown（英国）
CORRAL 9	WPS/PQR 管理（依据 ASME 第 IX 篇）	焊接研究所（美国）
CORRAL D1.1 WPS/PQR Data Base	依据 AWSD 1.1，可输入、浏览、查询和打印焊接工艺与 PQR，对焊接工艺和 PQR 提供了母材、母材厚度、工艺参数和填充材料的组合查询	美国焊接研究所
Weldermanager	焊接数据库	美国焊接研究所
SUPER WELD BEST	材料定额、焊接工艺规程编制指导（依据 AWS D1.1）	Bag Singer 工程软件公司（美国）
激光加工数据库查询系统	对激光焊接、激光切割和激光表面改性的常用材料的工艺参数进行查询、修改、添加、输出等	大连铁道学院

1.4.2　焊接材料数据库系统

随着钢材种类的不断增多和焊接技术的不断发展，焊接所采用的焊接材料种类越来越多。由于焊接材料的选用是否合理对产品焊接质量、劳动生产率和产品成本的影响极大，因此在根据焊接结构、材料的化学成分、力学性能、焊接工艺性及工作环境等进行焊接材料选用时，焊接技术人员需要了解各种焊接材料的性能及其相关信息，如焊接材料的生产厂家、材料的性能和价格等，以便选择合适的焊接材料。

焊接材料数据库系统在对焊条、焊丝、焊剂、钎焊材料、粉末及金属材料方面的信息数据进行分类管理的基础上，提供了高效快捷的查询方法，包括材料成分、性能、国内外牌号对照、焊接材料供销等方面的信息，从而为辅助焊接技术人员进行焊接材料选择、分析焊接材料市场提供了有效途径。表 7.3-3 所示为国内外开发的典型焊接材料数据库系统。

表 7.3-3　焊接材料数据库系统

软件名称	主要功能	开发单位
焊接材料数据库管理系统	对焊条、焊丝、焊剂、钎焊材料、粉末及金属材料方面的信息数据进行分类管理，可查询包括材料成分、性能、国内外牌号对照以及焊接材料供销等方面的信息	辽宁工程技术大学
焊接材料数据管理	焊条、焊剂、焊丝管理	哈尔滨焊接研究所
Filler2	焊接材料数据库	Darvignan 工业公司（英国）
WELD SELECTOR	焊条选择咨询（参照 ASTM/AWS）	美国焊接研究所
Electrode Selection	焊条（焊丝）咨询	Penton 教育分部（美国）
SANWELD	焊材选择	Sandvik（丹麦）



1.4.3　钢材成分与性能数据库系统

焊接技术人员在制定焊接工艺时，需要查询了解国内外材料的牌号、成分和性能以及它们之间的对照关系，材料的焊接性、焊接CCT图对焊接工艺的制定和规范参数的选择起着重要作用。焊接CCT图是正确选择焊接材料、确定最佳焊接工艺、消除焊接裂纹、制订焊后热处理规范的重要依据，尤其为焊接工艺的改进提供了较为全面的基础数据，把焊接工艺的确定从试验定性摸索提高到数据定量分析阶段。

材料成分和性能数据库系统的建立为材料的查询和焊接工艺的制定工作提供了方便。国内外开发的有关钢材成分和性能的数据库系统如表7.3-4所示。日本国立金属材料技术研究所从20世纪70年代初开始研究和积累焊接CCT图，1986年建立了焊接CCT图数据库及热循环计算程序。输入钢材化学成分或相变临界点，可查询出其CCT图，输入焊接工艺参数可计算出指定点的热循环曲线，并与CCT图叠加，计算出HAZ的组织成分和硬度，为防止冷裂纹及选择合理的规范参数奠定了重要基础。

表7.3-4　材料成分和性能数据库系统

软件名称	主要功能	开发单位
计算机辅助焊接工艺设计	焊接工艺、材料性能、CCT图管理	甘肃工业大学
焊接CCT图数据库及热循环计算程序	CCT图管理、热循环计算、HAZ组织成分和硬度预测	日本国立金属材料技术研究所
焊接数据库	PQR管理、WPS管理、钢材牌号对照、CCT图管理	清华大学
焊接CCT图分析及最佳焊接规范选择专家系统	CCT图管理、最佳焊接规范选择	冶金部建筑研究总院
电子版焊接CCT图的制作与应用	CCT图管理和查询	新疆大学
焊接性试验结果数据库	铁研试验、插销试验、最高硬度试验、冷裂纹敏感性试验	哈尔滨工业大学
冷裂纹专家系统	插销试验	天津大学

1.4.4　焊工培训与档案管理数据库系统

对于锅炉、压力容器、压力管道、船舶、核电设施等重要的金属焊接结构，为了保证产品的焊接质量和安全性，焊工在施焊前必须根据有关焊工培训和考试规则的要求进行培训考试，只有培训考试合格并获得相应持证项目的焊工才能从事有关产品的焊接工作。一般来说，每个焊工都有几个甚至十几个特定项目的合格证。同时，焊工的考核也具有时效性，有效期一般为3年，到期项目必须进行复验，这就决定了焊工的培训及档案管理是劳动强度大、信息量庞杂的工作，特别是对于焊工比较多的企业。为此，许多企业建立了焊工培训和档案管理数据库系统（表7.3-5）。

表7.3-5　焊工培训与档案管理数据库系统

软件名称	主要功能	开发单位
焊接培训管理系统	焊工培训档案管理和多媒体教学	内蒙古电力科学研究院
焊工培训管理软件	焊工培训试题库管理和焊工档案管理	吉林省电力科学研究院
焊接培训管理系统	焊接材料管理、焊接工艺评定管理、焊工考核管理、焊工技能档案管理、培训信息管理	福建省电建一公司
焊接培训考试题库系统	焊工、焊工技士、焊接工程师、焊接技术员、焊接技师等自动配题	哈尔滨工业大学 哈尔滨焊接技术培训中心
焊工培训档案微机管理	焊工培训档案管理	沈阳工业大学
焊工培训档案管理系统	合格证到期预警、焊工资料查询、培训费用查询、数据库维护	重庆大学
焊工档案计算机管理系统	焊工档案的建立、查询、焊绩统计和行政汇总、制表，数据建库，增、删、改记录，过期项转移存放	北京燕山石化建筑安装工程公司、清华大学
焊工档案管理系统	焊工档案管理（基于Browser/Server）	哈尔滨工业大学 大庆石油管理局
焊工档案管理系统	焊工档案的查询、更新及输出	锦州锅炉有限责任公司
北化建焊工档案管理	对焊工进行分类、查询和管理，获得焊工的各种数据；并可建立新数据库，修改、添加数据	清华大学



续表 7.3-5

软件名称	主要功能	开发单位
锅炉压力容器焊工考试档案微机管理系统	焊工考试登记、考试记录、成绩、检验报告等的记录、查询、统计及打印有关报表，数据的整理，系统的维护	北京锅炉厂
焊工档案管理	焊工档案管理	哈尔滨锅炉厂
焊工资格管理	焊工档案管理	兰州石油化工机器厂
焊工技能评定数据库系统	记录焊工的个人状况、考试参数及焊接参数等；定期提供各种数据报表	巴地蒙雨电器公司（美国）
Welderqual	存储、检索焊工质量记录，提示焊工及时操练过期的记录，辅助管理人员决定工作人员	Edison Welding Institute（美国）
Weldmanage	追踪每位焊工的质量记录，监察某特定焊件的焊接质量，辅助焊接主管人作决策	Aemrican Welding Institute（美国）
WELDER QUALIFICATION	焊工记录管理	IVF（瑞典）
Weldpro	按 ASME、AWS 或 MIL－STD 的标准确定焊工的工作范围，并可根据焊接工艺及接头形式决定焊接参数，查询出符合生产标准的所有焊工及其记录	Galaxy Computer Services，Inc
Weldpro Plus	记录、计算每位焊工每种焊接类型、组成或设备的焊接成功率，可增加用户特殊要求	Galaxy Computer Services，Inc
SWQS	基本按 ASME 标准，对 SWS 范围内企业的焊工的焊接质量进行跟踪监察，以便于焊工的流动和避免重复的资格确认工作	Singapore Welding Socity

焊工培训和档案管理数据库系统的建立和应用，可以辅助完成焊工资格审查、焊工培训和考核、焊工持证项目到期检查及焊工考试通知等各项管理工作，并使企业能够在最短的时间内掌握焊工的水平能力等信息，从而使焊工档案的管理摆脱繁忙的手工劳动，实现焊工档案管理工作的系统化、科学化、规范化、自动化，达到提高企业焊工档案管理效率的目的，为主管部门和各企业提供快速准确的焊工信息，保证焊接施工质量。

此外，某些焊工培训系统还提供了焊工培训考试题库管理，并将多媒体教学手段运用到焊工技术培训工作中，从而将焊接技术培训工作推上了一个新的台阶，使之进一步科学化、合理化，提高了培训质量、效率。多媒体技术是一门综合、集成的计算机技术，利用多媒体技术的计算机系统作为一种新型的教学方式，可以在焊接培训过程中将图像、声音、文字等有机地结合在一起，多角度阐述复杂的焊接技术，变抽象的知识为生动、形象、具体、直观，可以在不增加人力、物力的情况下改变目前各地区培训手段单一、保守、教材资料落后、师资力量匮乏、不能将先进技术及时纳入到培训中来的局面，同时也使焊接培训工作能具有更高的科技含量，空前扩大教学规模，真正做到因人施教、因材施教，同时通过文字、图像及适时的解说，让学员身临其境，易于被培训者掌握。

1.4.5　焊接生产与质量信息管理数据库系统

数据库是先进制造和管理系统中对生产过程和产品质量信息进行组织和监控的有效工具，随着企业管理体系在信息化和信息资源利用方面的需求不断提高，采用以数据库为代表的计算机辅助质量控制（CAQC）已成为企业信息化的重要标志。

新一代的数据库在其功能上由过去单独地对数据进行整理和归纳向知识化和逻辑推理的方向发展。例如，在以高自动化程度和大批量生产为特点的汽车制造行业，对汽车部件生产过程和加工质量实行动态、宏观的监控，推行“通用控制”、“过程判断”等质量管理标准，加强对不合格品的原因分析、整改和跟踪等措施，有效地提高了产品质量，降低了消耗，增强了企业的素质与活力，将质量管理和控制由“事后把关”变为“过程预测”或“事前预防”。又如，造船企业质量管理中的一个非常重要的环节是船体焊接质量的管理，而焊接质量管理的关键是焊接质量数据的可追溯性。随着计算机数据库系统、计算机网络技术的发展，通过建立焊接质量数据库管理系统，人们能够高效率地管理和利用焊接质量数据，并在此基础上建立高效率的焊接质量数据追溯系统，实现焊接质量数据从材质、工艺过程以及责任的可追溯性，从而不但可以提高和保证造船质量，而且能够降低造船成本、缩短造船周期，提高造船企业的竞争力。

表 7.3-6 所示为国内外开发的有关焊接生产和质量信息管理数据库系统。其中，第一重型机械集团公司开发的“焊接生产信息管理系统 WPMIS”实现了焊接工艺管理、劳动定额管理、材料定额管理、制造过程中焊接目标成本控制管理、生产计划管理、生产调度管理、完工统计管理等，适用于金属结构产品加工制造的企业。该系统的应用提高了企业工艺编制的质量和速度，控制了计划工时和计划成本，提高了设备和金属材料利用率，减少了在制品积压，缩短了产品加工周期、大大减轻了各类人员劳动强度，使管理更加科学化，给企业带来了明显的经济效益。

1.4.6　焊接标准和知识咨询数据库系统

为了不断提高焊接技术水平，规范焊接生产，长期以来，各国制定了数量可观的焊接标准并不断修订。焊接工程技术人员在进行焊接工艺设计、拟定焊接工艺试验方案、编制焊接工艺文件等工作时必须以有关标准为依据。但由于焊接标准内容十分繁杂，如采用人工方式管理则效率很低，无谓的重复劳动很多，查找和理解标准要花费很大精力，并且由于新旧标准的更替，更增加了管理和掌握焊接标准的难度。建立焊接标准咨询系统，可以借助于现代计算机强大的存储及运算能力，方便焊接技术人员对这些信息的查询和管理，帮助他们熟悉和理解标准，使繁琐的工作变得简单轻松。



表 7.3-6　焊接生产和质量信息管理数据库系统

软件名称	主要功能	开发单位
车身装焊质量信息管理系统	实现了对车身装焊工艺、质量检测、统计过程控制与诊断、报表输出的网络化管理；采用统计过程控制（SPC）和统计过程诊断（SPD）方法对车身装焊质量进行实时监控、趋势预报和故障原因分析	清华大学
基于数据挖掘的焊接生产管理平台	在质量在线监测平台和数据库系统的基础上，建立了焊接车间数据集市，采用数据挖掘技术从大量生产历史数据中获得潜在的规律性和趋势，为管理者提供决策支持。使用控制图控制焊接生产产量和废品数量，利用决策树方法分析废品产生因素	华南理工大学
焊接质量管理系统	通过对造船厂焊接施工记录管理体系的分析，建立了焊接质量管理数据库系统，实现了造船厂焊接工程数据的计算机数据库系统管理。提出了造船过程中焊接质量数据的计算机追溯模型，实现了焊接质量数据从材质、工艺过程以及责任的可追溯性	江南造船厂 海军工程大学
焊接生产信息管理系统 WPMIS	焊接工艺管理、劳动定额管理、材料定额管理、制造过程焊接目标成本控制管理、生产计划管理、生产调度管理、完工统计管理	第一重型机械集团公司
焊接质量数据库	应用 SPC 方法对焊接生产过程和产品质量状况进行分析和监控，确保整个生产线生产能力的稳定	华南理工大学、上海汇众汽车有限公司重型汽车厂
计算机辅助焊接生产管理系统	实现了焊接生产计划和消耗材料的计算分解和编排计算	济南二机床集团公司
焊工资格与生产质量管理系统	焊工资格认证管理和焊接质量控制	西安交通大学
焊接资源管理计算机支持协同工作系统	通过对焊接资源的分析，利用公司内部局域网的软硬件系统，建立数据库平台，使公司不同部门、单位的人员通过通信系统和共享数据库实现焊接资源共享	大庆石油管理局油田建设公司
WELDING CO－ORDINATOR	制造信息管理	TWI（英国）
Weldplan	焊接生产计划	焊接研究所（丹麦）

表 7.3-7 所示为国内外开发的有关焊接标准咨询的数据库系统。其中太原重型机械集团有限公司技术中心采用 Delphi 开发的“焊接技术标准与信息动态计算机管理系统”，以国家标准、行业标准和企业焊接技术标准为基础，以高效的管理为出发点，目录编排层次按公司质量结构的焊接技术标准体系排列，分类序号即是标准体系的结构层次号，每个结构层次根据需要可增设下一层次。分类目录中技术标准的编排是在同一分类序号下依次列出国家标准、行业标准和企业制定的焊接技术标准，每一部分的排序是按同类标准号从小到大排列。操作人员可通过输入标准号、分类号、标准名称、发布日期、实施日期、替代标准等关键词准确检测到所需标准。也可按标准的分类顺序阅读和打印输出等。系统层次分明，便于保存、修改和调用，具有准确、迅速和简便等特点，缩短了焊接技术准备周期，提高了工作效率。

表 7.3-7　焊接标准和知识咨询数据库系统

软件名称	主要功能	开发单位
焊接技术标准与信息动态计算机管理系统	包括标准显示、浏览、目录结构收缩、标准目录编辑、标准内容编辑、按标准编号、标准名称、标准年代号查询、组合查询、标准部分打印、标准全部打印等功能	太原重型机械集团有限公司技术中心
焊接国家标准查询系统	可查询国内外各种标准代号的简要信息，我国焊接国家标准的索引信息及详细信息，包括焊接基础通用标准，焊接材料标准，焊接质量试验及检验标准、焊接方法及工艺标准、焊接结构标准、焊接设备标准、焊接安全与卫生标准、焊工培训与考试标准等共八类；并具有焊接新旧标准对照，焊接名词术语英汉互译，单位换算及常用数据查询等功能	辽宁工程技术大学
钢制压力容器焊接标准和知识咨询系统	可查询常用的各种钢材的化学成分和力学性能、国内外钢材牌号对照、常用焊接材料的成分和应用、有关焊接标准以及焊接基础知识	清华大学
钢制压力容器焊接工艺评定标准咨询系统	查询 JB4708 的有关内容	哈尔滨工业大学
焊接标准咨询系统	查询 ASME 第 IX 篇的有关内容	BerNask（美国）
Turbo IX	查询 ASME 第 IX 篇的有关内容	美国

2　焊接数据库应用系统分析和开发

随着计算机技术及网络技术的发展和应用的不断普及，焊接数据库应用系统已经或正在获得越来越广泛的应用。对于焊接生产和管理信息系统来说，如何选择合适的数据库进行应用系统的开发是一个非常重要的问题。

本节在简单介绍数据库基本知识的基础上，具体介绍数据库管理系统和数据库应用程序开发工具的选择以及焊接数据库应用系统的设计和开发。

2.1　关系数据库系统基本原理及其设计

数据库从产生至今，产生了基于层次模型、网状模型、关系模型、面向对象模型的多种不同类型的数据库。目前，使用最广泛、技术最成熟的是基于关系模型的关系数据库。很多大型的数据库管理系统都采用了关系模型。

2.1.1　关系模型与关系数据库

关系模型是现有几乎所有数据库系统都支持的数据模型。之所以如此，是因为关系模型相对于其他数据模型有着更严格的数学理论基础。关系模型概念清晰、简单，可以用统一的结构来表示数据及数据和数据之间的关系。

关系模型的基本组成单元是表（table）和关系(relation)。在关系数据库中，每个关系是一张命名的二维表，表的每一行称为一条记录，每一列称为一个属性。例如，图7.3-8所示为某公司的分公司－焊工信息模型。其中分公司、焊工在关系模型中如表7.3-8、表7.3-9所示。关系在关系模型中如表7.3-10所示。

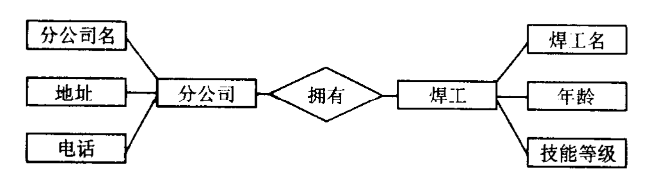


图7.3-8　分公司－焊工信息模型

表7.3-8　分公司

分公司名	地址	电　　话
分公司A	北京	010－XXXXXXXX
分公司B	北京	010－XXXXXXXX

表7.3-9　焊工

焊工名	年　龄	技能等级
张天	31	B
赵鹏	28	C

表7.3-10　焊工－分公司

焊　工	分 公 司
张天	分公司A
赵鹏	分公司B

可以看出，利用关系模型可以方便地存储数据和表示数据与数据之间的关系。基于关系模型的数据库称为关系数据库。

2.1.2　关系数据库系统基本概念和术语

在关系数据库的选择和开发过程中经常出现如下一些概念和术语。

1）关系　一个关系对应一张二维表，表名即为关系名。例如分公司、焊工等。

2）关系代数　以关系为运算对象的运算集合。

3）关系模型　以关系为基础的数据模型。

4）关系数据库　以关系模型为基础的数据库类型。

5）表　一组彼此相关的记录的集合，表示不同属性间的关系。

6）记录　一组彼此相关的数据的集合，表示一个具体的对象。例如表7.3-8中对应分公司A的整行信息。

7）字段　一个特定属性的表示，例如表7.3-9含有焊工名和年龄等字段。

8）主键　指表中的某一字段，通过此字段可以唯一地区分不同的记录。例如表7.3-8中可以通过分公司名唯一地表示不同的分公司记录。

9）外键　指表中某一和另外一张表的主键相同的字段。例如表7.3-10中分公司即为外键。

2.1.3　关系数据库设计

（1）信息模型的建立

将数据库技术应用于日常生产管理中，首先需要建立信息模型。信息模型是现实世界中相关事物、概念及其相互关系的抽象。信息模型要解决的主要问题是：

1）以易于为用户所理解和接受的方式表现现实世界中各种事物、概念及其相互关系；

2）可以方便地转化为计算机所能使用的数据模型；

3）充分反映系统中各类信息及其相互关系。

为解决这些问题，我们将现实世界中的事物与概念抽象为实体，将事物、概念所具有的各种特征抽象为实体的属性，将事物、概念之间的相互关系与依赖抽象为实体之间的联系或关系，使现实世界中的事物、概念及其相互联系与信息模型中的实体及其相互关系具有一一对应的关系，同时，又使这种实体及其相互关系对应于数据世界中的某种数据的集合或易于被某类数据所表征。

建立信息模型的方法有很多种，目前比较成熟且广泛应用的有ER方法和$\mathrm{IDEF_{1X}}$方法。

ER方法是一种实体-联系方法，用于描述和定义系统中的信息和其内在的联系。ER方法使用ER图描述信息模型，它简便、有效，是目前数据库设计中的通用方法。图7.3-9是采用ER方法建立的一个信息模型。

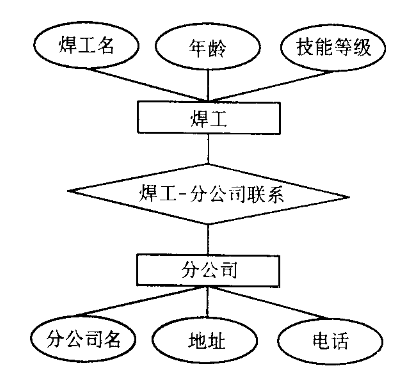


图7.3-9　ER模型建立的焊工-分公司信息模型

$\mathrm{IDEF_{1X}}$方法是一种语义数据模型化技术，主要用来支持信息模型的开发，并具有一致性、可扩展性和可变换性。用$\mathrm{IDEF_{1X}}$方法建立的信息模型可以作为数据库设计的主要依据。图7.3-10是利用$\mathrm{IDEF_{1X}}$方法建立的信息模型。

（2）从信息模型到数据库的设计

在建立了完善的信息模型后，需要将信息模型转换为数据库系统的数据模型。将信息模型转换为关系模型需要经过



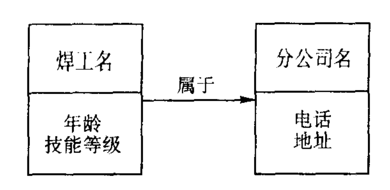


图7.3-10 IDEF$_{1X}$方法建立的分公司－焊工信息模型

以下过程。

1）将实体及其属性转化为关系及其属性 信息模型中每一个实体都可以转化为一个关系，关系名即为实体名，实体的属性即为关系的属性。例如，焊工实体可以转换为焊工关系，其拥有焊工名、年龄、技能等级等属性。

2）将不同实体之间的联系转化为关系 信息模型中实体之间的联系都可以转换为关系。依据联系的类型（1:1，1:n，m:n）选择不同的方式将联系转换为关系。

3）检查并去掉多余的关系 检查信息模型中的冗余关系，精简关系模型的结构。

4）合并可归并的关系 检查并合并可以合并的关系（一般为主键相同的关系），精简关系模型的结构。

5）规范化关系模式 在将信息模型转换为数据模型的过程中，按照规范化的原理和方法，需要具体分析所得到的各关系是否存在部分函数依赖、传递函数依赖和多值依赖等，并进行模式的规范化。

2.2 结构化数据库查询语言SQL

SQL语言是由IBM公司的E.F.Codd在20世纪70年代最早提出，并由Chamberlin和Boyce在1974年实现的。1986年，SQL语言作为关系数据库管理系统的标准语言，被国际标准化组织采纳为国际标准。经过30年的发展，SQL语言已经在Oracle、SQL Server等数据库中得到成功应用。

2.2.1 SQL语言的功能

SQL语言是在关系代数的基础上建立起来的第四代计算机语言，具有很强的功能。SQL语言的主要功能分为数据定义、数据操纵、数据控制等。

1）数据定义（DD） 关系数据库以关系为基础，采用表的方式存放和管理数据。因此，建立数据库首先需要根据信息模型建立相应的数据表。为了更好地组织和应用数据，相应地引入了视图、索引、触发器等概念。数据定义语言（DDL）负责完成这些定义工作。数据定义包括建表、修改表定义、删除表、创建视图、修改视图、删除视图、创建索引、创建触发器等。

2）数据操纵（DM） 数据操纵负责对数据库中的数据进行读写操作。在SQL语言中，对数据的读写比较灵活且全面。数据操纵语言（DML）主要完成数据的插入、修改、删除、查询等。数据的查询又分为基本查询、投影操作、条件查询、排序输出、多表查询、连接操作、集合操作、元组变量、聚合操作、重值处理、子查询、树查询等。

3）数据控制（DC） 数据库是一个共享资源，可以由多个用户使用，为了保证在数据库使用过程中的数据安全和正确有效，必须提供一定的机制。SQL语言在形成之初就全面考虑了数据保护的问题。SQL采用数据控制语言（DCL），通过用户标识、系统鉴别、存取控制、审计功能，实现数据库的安全性，保护数据库防止不合法的使用所造成的数据泄露、修改、破坏；通过五种完整性约束保证数据库的正确性和兼容性；通过事物控制保证一个正常操作过程的完整进行；通过并发控制保证多用户同时访问数据库的安全性和迅捷性；通过数据后备和恢复功能保证数据库在出现故障时可以迅速恢复到故障前的状态，防止大量数据的丢失。

2.2.2 SQL语言的特点

SQL语言是一种综合的、通用的、功能极强的关系数据库语言。它具有以下特点。

1）非过程化 SQL语言是非过程化语言。和其他过程化编程语言不同的是，在SQL语言中，用户只需要关心做什么，而不需要知道怎么做，SQL语言会自动帮助用户解决问题。

2）一体化 非关系模型的数据库语言对于数据库的三种功能（数据定义、数据操纵、数据控制）有各自独立的语言形式，而基于关系模型的SQL语言可以采用统一的形式实现数据库的三种功能。SQL语言可以实现数据库生命周期的全部活动，其中包括建立和组织数据库、实现账号管理、定义关系模式、查询及数据维护、数据安全控制等。这也带来了数据库语言的统一性。

3）采用统一语法结构的两种使用方式 SQL语言通常有两种使用方式，包括数据库控制台使用方式和嵌入高级程序使用方式。虽然有两种不同的使用方式，但SQL语言有着统一的语法结构，这样SQL语言的使用者可以方便地适应不同的数据库应用环境，加快构造符合自己条件的数据库系统。

4）方便的可扩充性 SQL语言在1986年就成为了国际标准，具有很强的功能，但是在某些方面也存在着一些不足，因此需要在标准SQL语言的基础上进行功能扩充。SQL语言在设计之初就考虑了扩充性。很多成功的数据库系统中都对标准SQL语言进行了扩充，以实现更多的功能。例如ORACLE中提供的PL-SQL和SQL SERVER中提供的Transact-SQL等。

2.3 典型数据库管理系统

在目前的数据库管理系统市场上，关系数据库应用最广泛，技术最成熟。焊接企业可以采用的后台数据库系统有FOXPRO、ACCESS、SQL SERVER、ORACLE、MYSQL、DB2、SYBASE、INFORMIX等。

2.3.1 FOXPRO

FOXPRO是FOX公司于20世纪90年代初推出的FOXBASE的升级换代产品。FOXPRO采用了许多先进技术，提供了强大的功能。FORPRO最主要的特点是将数据库系统和可视化开发工具集成在一起，用户可以方便地构造数据库应用程序，甚至以EXE文件的形式分发应用程序，而不需要关注数据库连接、数据库操作的过多细节。

1997年，Microsoft公司推出了Visual FoxPro版本，引进了Internet和Intranet的支持，并实现了ActiveX技术。Visual FoxPro延续了FoxPro全部优点，完全向下兼容，同时在技术上有所突破，不仅可以独立地作为数据库管理系统的开发软件，而且提供了和Oracle和SQL Server等大型数据库系统的接口，从而可以作为大型数据库系统的前端开发工具。

FOXPRO主要采用DBF文件保存数据，也就是文本文件格式，并且数据库操作主要采用解释执行的方式，而不是其他大多数数据库编译执行的方式。这样的设置对于小型单机应用来说，会比较方便，效率也有一定的保证。但是一旦数据规模变大以后，FOXPRO就会显示较低的效率。同时采用DBF文件格式保存数据，存在很大的安全性问题，虽然这可以通过用户的自主加密得到一定的解决，但是增加了系统的开销。因此大型数据库的很多理念无法真正地在FOXPRO上体现出来，FOXPRO更适合于中小型单机数据库应用系统的开发。随着FOXPRO新版本的问世，FOXPRO将越来越完善。

2.3.2 ACCESS

ACCESS是Microsoft公司推出的基于Windows的桌面型关系数据库，是真正体现了大型数据库概念的小型数据库系统。

ACCESS采用方便的可视化操作环境，提供了许多功能



强大的操作向导和模板（例如表创建模板），方便用户进行数据库的构建和管理。在数据存储形式上，ACCESS和FOXPRO一样都是采用文件形式，但是ACCESS加入了自己的数据保护，即采用二进制码保存数据（mdb文件），同时提供了相当丰富的用户权限管理功能。ACCESS采用编译执行的方式，具有较高的效率。此外ACCESS由于Microsoft的关系能方便地和Microsoft公司的其他产品相集成。

ACCESS 2000支持的对象包括表、查询、报表、窗体、宏、模块、网页等，所有的对象都存放在同一个数据库文件中。其中表是数据库的核心和基础，用于存放所有的数据信息。用户可以通过报表、查询和窗体从表中获得符合特定条件的数据信息，同时实现计算、统计、打印、编辑等功能。ACCESS 2000还加强了网页功能，用户可以轻松地完成网页的发布。

ACCESS可以方便地和各种应用系统开发工具（VC、VB、Delphi等）相结合，开发模块独立、界面友好的应用程序。

ACCESS在管理模式上和大型数据库相似，使用SQL语言作为唯一的数据处理手段，因此采用ACCESS的应用系统可以根据需要经过较少的改动而升级到大型数据库系统中。

当然由于是桌面型数据库，和FOXPRO一样在网络处理和并发处理上有一定的缺陷，因此ACCESS更适合于单机版或者用户较少的中小型数据库应用程序的开发。

2.3.3 SQL SERVER

SQL SERVER是Microsoft公司开发成功的高性能的客户机/服务器方式的关系型数据库系统，随着版本的更新，SQL SERVER提供了越来越先进的数据库技术。SQL SERVER以标准的SQL语言为基础，经过功能扩展提出了自己的扩展Transact-SQL语言，具有高性能、高可靠性和可扩充性的优点，新版本的SQL SERVER 2000数据库更重新设计了系统的体系结构，增加了许多功能。这些都使SQL SERVER成为一个出色的数据库平台，可以用于大型联机事物处理、数据仓库及电子商务等。目前SQLSERVER在市场上也占有相当大的份额。

由于Microsoft是Windows的缔造者，因此SQL SERVER可以非常紧密地和Windows相结合，从Windows 95/98到Windows XP甚至嵌入式操作系统Windows CE都可以很好应用，大大提高系统运行的速度和稳定性。SQL SERVER采用图形化的用户界面，提供丰富的编程接口，方便用户对数据库进行管理和应用。同时SQL SERVER可以方便地和Microsoft公司的其他产品集成，包括Office、IIS、Visual Basic、Visual C++、Visual InterDev等，从而提供更为强大的功能。新一代的SQL SERVER全面提供了对Web技术的支持，加入了对XML的支持，用户可以方便地将数据发布到Internet上，形成自己的网络化数据应用程序。在安全性能上，SQL SERVER提供较高的安全级别，除自身的身份认证模式，还可利用Windows本身提供的用户认证模式实现对用户权限的管理。SQL SERVER努力实现智能性，用户可以不必过多地关注系统运行的参数，由数据库智能配置（包括页面的大小、段的空间管理、缓冲区管理、动态加锁等）就可得到较为理想的性能表现。

通过SQL SERVER，用户可以方便地开发自己的数据库应用系统，包括数据仓库、企业信息管理系统等。

2.3.4 ORACLE

ORACLE数据库是ORACLE公司提供的一个非常成功的关系型数据库系统。经过多年的发展，ORACLE已经被广大用户所接受，占据了很大的市场份额。

ORACLE在标准SQL结构化查询语言基础上做了很大程度的扩展，形成了PL-SQL，支持多种系统平台（Windows、Linux、OS/2、Mac等）和多种语言。ORACLE没有范式要求，支持大至2 GB的二进制数据，具有丰富的开发工具。在数据安全方面，ORACLE拥有C2级（最高级）的数据安全级别，通过SQL * DBA控制用户权限，提供数据保护和数据库监控功能；同时没有读锁，采取快照SNAP方式完全消除了分布读写冲突，并且可以自动检测和解决死锁和冲突。ORACLE支持多种体系结构（集中式、分布式、客户机/服务器）及混合的体系结构，可以适应局域网数据库应用环境。在面向对象技术方面，ORACLE做了很多有益的尝试，部分实现了面向对象的技术细节。随着Internet的广泛应用，ORACLE在新版本中加入了对Internet的全面支持。

ORACLE有着灵活的管理特性，客户可以根据自己的需要和运行的实际情况调整运行参数。与此同时，正因为ORACLE的灵活性和强大功能，使用起来也比较复杂，因此ORACLE更适合于大型数据库应用系统，例如面向制造系统的管理信息系统和财务应用系统等。

2.3.5 MYSQL

以上介绍的都是主要应用于Windows的数据库系统。对于正在蓬勃发展的Linux，有一个和它关系非常密切的数据库产品，那就是MYSQL。

MYSQL是一个小巧玲珑的多用户数据库系统，基于客户机/服务器结构，除了支持标准的SQL语句外，它还支持多种平台（Windows、Unix等），而在Unix/Linux系统上，MYSQL支持多线程运行方式，这可以得到相当好的性能，更可以从Linux获得公认的数据安全性。和Linux一样，MYSQL也是基于开放源代码的，因此利用MYSQL构建自己的数据库应用系统是相当经济的。在Unix/Linux下有一个非常有用的Web应用开发工具——PHP。PHP可以和MYSQL紧密结合构建稳定的网络服务程序。MYSQL也存在一定的缺陷，由于基于开放源代码，因此无法形成大规模的投入，在应用规模上受到了局限。同时MYSQL缺乏一些先进数据库所具有的特性，例如transaction功能等。因此MYSQL比较适合于中小型数据库应用系统，包括一些网上数据应用系统等。

在目前的数据库市场上，上述数据库产品占据了大部分的市场份额。除此以外，还有一部分数据库产品在不同的环境得到应用，例如DB2、INFORMIX、SYBASE、DBASE、PARADOX、POSTGRES等。它们各自有自身的特点，在今后一段时间内仍将发挥重要作用。另外，随着数据库技术的发展，很多新型数据库系统也将问世，并在市场的检验中蓬勃发展。

2.4 典型应用程序开发工具

数据库管理系统是焊接数据库应用系统的基础，负责存放和组织焊接数据，提供方便全面的控制功能，同时也提供较好的数据安全。为了使焊接数据能够服务于日常生产管理，必须对数据库中的数据进行合乎自己意图的操纵和使用。一般来说，数据库自身并不提供数据应用的逻辑和工具（FOXPRO提供集成的开发环境，但仅适合于小型应用系统的开发），需要采用一些应用程序开发工具，进行焊接数据库应用软件的开发。本节将具体介绍一些被广泛应用且功能强大的应用程序开发工具。

2.4.1 Visual Basic

Visual Basic是Microsoft开发的，基于Basic语言的一种简单易用、功能强大的面向对象可视化开发工具。

Visual Basic最重要的一个特点就是能迅速有效地编制程序界面。用户只需要根据自己的要求，将各种控件拖入面板并作适当的调整就可以完成一个非常美观的界面，这对于应用系统的快速开发非常有效。利用Visual Basic支持标准

EXE、ActiveX、数据库、DHTML等各种应用，不仅可以开发各种桌面应用程序，也可以创建各种企业级、分布式或基于网络的数据库应用系统，涵盖了当前几乎所有的开发需求。在数据库编程方面，Visual Basic主要采用ADO技术，也支持ODBC、DAO等开发机制，所有的数据库操作只需要通过控件即可完成，非常方便。

从1.0版本到6.0版本，Visual Basic作了很大改进，但是在面向对象方面还是有很多不足，缺乏继承性、线程特征以及结构化的异常处理。这在最新的Visual Basic.NET中已经得到解决。Visual Basic.NET是完全面向对象的开发工具，同时具有强大的Web应用开发功能。作为一种简单易用的开发工具，Visual Basic也有着一些缺点，那就是程序执行速度较慢（采用结实方式执行），不适合于系统底层操作和大型软件的开发。因此Visual Basic比较适合于中小型的应用程序开发，当然也可以成功地开发中小型数据库应用系统。

2.4.2 Visual C++

Visual C++是Windows下开发的面向对象应用程序的一个非常有用的开发工具。从1993年第一个版本的Visual C++开发成功到现在已经过去了整整十年，十年间Visual C++从1.0版本到6.0版本直到现在.NET下的Visual C++.NET，功能有了非常大的提高。

Visual C++提供了一个可视化的集成编程环境，可以开发MFC（Microsoft基础类库）应用程序、COM组件、Win32程序等。相对于Visual Basic，Visual C++更贴近于Windows的底层，因此Visual C++可以开发直接对系统进行底层操作的程序，这对于许多要求效率和功能的应用非常适合。在开发过程中Visual C++提供Class View（类视图）和Class Wizard（类向导），可以有效地组织和管理；Visual C++提供资源编辑器，可以方便地进行快捷键、对话框、二进制等的编制。在数据库操作方面，Visual C++提供ODBC、DAO、ADO、OLE DB等多种开发机制，可以连接几乎所有的数据，在效率和开发成本上取得一个良好的平衡点。Visual C++也适合网络下的程序开发，可以方便开发客户端/服务器端结构程序；在.NET下和XML及ASP紧密结合，更可以开发基于Web应用的应用程序。

但是正是由于Visual C++的功能强大和灵活性，Visual C++在理解和应用上会比较困难，同时也在程序的安全实现上对程序员有更高的要求。因此Visual C++作为一个非常成功的开发工具，适合于大型的应用程序开发，包括数据库管理系统、焊接应用系统、Web应用系统、C/S结构系统等。

2.4.3 Delphi

Delphi是Boland公司开发的功能强大的可视化编程环境，采用了弹性可重复利用的完整的面向对象程序语言（基于Object Pascal语言）和先进的组件技术。

Delphi提供了各种开发工具，包括集成环境、图像编辑（Image Editor），以及各种开发数据库的应用工具，如Desktop Database Expert等。除此之外，还允许用户挂接其他的应用程序开发工具，如Borland公司的资源编辑器（Resource Workshop）。相对于Visual Basic，Delphi功能更为强大，生成的.EXE文件运行速度更快，并且编译后不需要其他的支持库就能运行；相对于Visual C++，Delphi则在保证功能的前提下更简单易用。

Delphi提供了强大的数据库应用程序的开发功能，适应于多种数据库结构，从客户机/服务器模式到多层数据结构模式，具有高效率的数据库管理系统和新一代更先进的数据库引擎、最新的数据分析手段和提供大量的企业组件（BDE、ADO等），以方便程序设计人员开发数据库应用程序。在Delphi中，一个非常有用的特性就是部件之间可以继承与被继承，各部件之间的这种关联便构成了一个层次结构。因此Delphi适用于各种数据库系统、系统应用程序等类型的开发。

2.4.4 Java

Java是由美国SUN电脑公司发展出的第一种能在Internet上运行，具有跨平台交互能力的程序语言，是一种简单、面向对象、分布式、解释、健壮、安全、结构中立、可移植、高效能、多线程、动态的语言。

Java面向对象，提供丰富的类库，并有众多的第三方进行类库的开发，非常容易编写，且Java程序短小精悍，可以在小型机器上运行。Java支持分布式结构和多线程执行方式，很容易地与HTTP和FTP等TCP/IP通讯协定相配合。由于摒弃了指针、结构模型并采用数个层次的互锁保护措施和数组边界检查等，Java程序具有相当的稳定性和安全性。Java采用字节码（Java编写成功后将自动转换为独立于机器的字节码形式）和解释执行的方式，提供了可移植特性（只要目标机器拥有Java解释器即可）。同时由于采用了解释执行的方式，Java程序改动后不需要重新编译就可执行。

当然Java也有着许多缺点，首先采用解释执行的方式，必然导致执行速度的降低。其次Java创造之初的目的就是为了网络上的小型程序，因此Java不适合大型程序的开发。总之，Java非常适合跨平台的、实时要求高的网络化程序。

2.4.5 PowerBuilder

PowerBuilder是目前具有代表性的数据库应用程序开发工具之一，是Power Soft公司开发的应用于客户机/服务器体系结构下的应用程序开发工具。随着PowerBuilder在国内的普及，已逐渐被国内开发人员所熟悉。

PowerBuilder是一种面向对象的独立于数据库的可视化开发工具。可以同时支持SYBASE、ORACLE、DB2、INFORMIX等大型数据库，又可以通过ODBC接口连接FOXPRO等小型数据库。PowerBuilder基于事件驱动，提供不同类型的窗口、控件和功能强大的函数以实现程序员要求的功能。PowerBuilder还提供了一个智能化、功能强大的数据窗口对象（Data Window），利用它，应用程序开发人员无需编写专门的SQL语句，就可以实现对数据库进行显示、修改、更新、插入、删除和打印等操作。数据窗口（Data Window）是PowerBuilder的专利，也是PowerBuilder应用程序的核心和精华所在。随着PowerBuilder新版本的推出，出现了许多改进和新功能，增加了可以支持的平台数量，增强了建立因特网应用程序和分布式应用程序的能力，扩展了多语种支持。而且PowerBuilder也已经开始从传统的客户机/服务器开发环境转变成完全支持Web应用的开发环境。新的Java代理生成器使Java客户机能够直接访问PowerBuilder应用逻辑和对象。PowerBuilder直接支持ActiveX技术、Server Push技术，对分布式计算模型的定义更加明确，实现更为简便，并可以利用数据窗口直接生成HTML格式文件。通过PowerBuilder和合适的数据库，可以方便地实现适合于焊接应用的数据库应用程序。

2.4.6 ASP/PHP/JSP

ASP、PHP、JSP都是一种Web脚本语言。其中ASP是微软公司IIS中的一个组件，PHP则是代码完全公开的开放软件，JSP是SUN公司的一个产品。它们都运行在Web服务器端，根据用户请求或服务器端的数据产生动态网页，同时，由于它们是在服务器端的脚本，一般用户无法看到，从而有效地保证了系统的安全性及开发人员的知识产权。在语言规范上，ASP基于VBScript，JSP基于Jscript，PHP则基于C、Perl等多种基础语言。ASP采用了COM技术，同时可以内嵌于VB、VC等多种开发环境，因此ASP有着较强的功能。



PHP则有着和Apache服务器紧密结合的特性，因此执行效率更高。JSP则具有Java良好的跨平台功能和执行效率。

在数据库操作方面，ASP采用ADO技术，具有良好的性能表现。PHP则完全支持ODBC，可以操纵几乎所有的数据库，同时PHP和MYSQL可以说是完美的组合，很多成功的网络数据应用系统都是采用PHP和MYSQL实现的。

ASP、PHP、JSP都有着各自的不足。ASP的安全性能靠Windows保证，因此Windows的缺陷必将成为ASP的缺陷，同时ASP也无法完全实现一些企业级的功能：完全的集群、负载均衡等。PHP安装复杂，缺少企业级支持和正规的商业支持，功能相对较少。JSP则太过灵活，技巧要求太高，缺乏系统性的资料等。

因此ASP适用于企业内部管理信息系统、中小Internet应用、快速数据库开发的应用。PHP适用于Internet高访问量、快速数据库开发的应用。JSP适用于Internet/Intranet高可靠性应用、Internet/Intranet与Client/Server结合的应用系统等。

2.4.7 新的.NET环境

.NET是微软开发的用于未来网络开发和应用的平台，其内部提供的功能和机制等特别适合于B/S结构的系统开发。

.NET具有强大的数字化、网络化功能。.NET采用XML（Extensible Markup Language，类似HTML的用于描述和传输数据的标准协议）标准，全面支持SOAP（Simple Object Access Protocol，简单对象访问协议），全面打破周围存在的信息“孤岛”（例如手机、PDA、焊接工具、管理监控系统等），将所有的信息有机地结合在一起，为生活生产服务。

.NET拥有中间层语言和跨平台性。和Java一样，.NET采用了独立于CPU的中间层语言，可以方便地运行于多种硬件平台。为了配合.NET平台的普及和应用，微软开发了新一代的开发工具集——Visual Studio.NET。在这个工具集中，微软集成了四种开发语言，Visual Basic.NET，Visual C++.NET，Visual C#.NET，ASP.NET等。不同的开发语言都可以转换为中间层语言，增强了不同语言间的兼容性。同时.NET的中间层语言在执行时仍旧采用了编译的方式，大大提高了执行的效率。

在数据库应用方面，.NET提供了ADO.NET这种崭新的数据库操作组件。ADO.NET提供了更强大的数据库操作功能。

另外，.NET具有垃圾回收机制（自动检测那些不再被访问的对象，释放这些对象所占用的内存空间，防止内存泄露错误），且全面考虑了网络上的安全问题，提供了最细致的访问级别和安全机制。

采用.NET环境可以紧贴Microsoft公司的发展战略，从而第一时间采用新的信息系统开发技术。因此，.NET环境非常适合未来网络数据应用的场合，尤其是在企业信息管理全面进入网络化的今天，焊接数据库应用系统也需要充分考虑网络化的应用。

2.4.8 Visual C#.NET

Visual C#.NET是微软开发的一种全新语言，运行于.NET环境下。微软在自己的发展战略中提到，Visual C#.NET是微软主要提倡的一种语言。它集成了VB方便实用和VC底层操作和灵活性的特点，同时也全面集成了.NET的优点（强大的数字化、网络化功能，跨平台性，垃圾回收等）。

Visual C#.NET大部分采用了VC的语法结构，因此VC程序员可以很容易地过渡到Visual C#.NET中。Visual C#.NET是一种受管语言，内部提供了垃圾回收机制，因此程序员可以少关心内存垃圾的处理，而是主要关心程序实现的逻辑关系。Visual C#.NET是完全面向对象的，摒弃了非面向对象或者非完全面向对象语言的不足（全局变量等）。在数据库操作方面，C#可以充分利用ADO.NET实现强大的数据操作功能。C#更紧密结合了Internet，通过ASP.NET和XML可以轻松开发网络应用程序。同时C#语言已经通过了国际标准化委员会的认证，将会有更多的第三方一同来完善C#。因此，.NET下的C#非常适合于未来网络化数据库应用系统的开发，例如焊接数据库应用系统的开发。

除了上述典型的应用程序开发工具外，还有一些发挥着重要作用的开发工具，如C、Boland C++等。它们各自有着自己的特点，可以根据自己的需要和兴趣进行选择，同样可以达到既定的目标。但是采用上述典型应用程序开发工具，可以得到更多的技术支持和安全保证，更可以利用众多的网络资源加快应用程序的开发。

2.5 焊接数据库应用系统设计及开发

前面介绍了数据库的一些基本知识、典型的数据库管理系统和应用程序开发工具。对于焊接数据库应用系统的开发，需要首先从焊接数据库应用系统的分析着手，选择合适的数据库管理系统和应用程序开发工具，然后再进行设计，从而得到效率和成本平衡的、健壮稳定的焊接数据库应用系统。本节将主要介绍焊接数据库应用系统设计和开发的一些知识。

2.5.1 焊接数据库应用系统的分析

焊接数据库应用系统是有针对性的数据库应用系统，其主要目的是为焊接生产、管理提供方便的手段和良好的效率。在进行焊接数据库应用系统设计和实现之前，应该对需求和应用场合等作详细的分析。对于焊接数据库应用系统的分析主要有以下几点。

1）应用目的　在设计和开发之前，首先需要明确是开发怎样一种焊接数据库应用系统，有明确的应用目的。不同的应用目的对界面的设计和数据库的设计有着不同的要求。

2）应用场合　焊接数据库应用系统是为焊接生产制造企业服务的，但是焊接企业的规模有大有小。对于规模较大的企业，需要实现较大的数据库容量和访问容量。同时系统在不同部门使用，要求也有所不同，例如是在工艺设计部门使用还是在焊接施工现场使用等。由于应用场合的不同在界面设计上需要遵循一定的使用习惯，并考虑程序并发运行时的情形。

3）软硬件条件　不同的焊接生产企业有不同的软硬件条件。如一些小型企业可能无法购置较为先进的计算机硬件或软件，而大中型企业或外资企业则有着大量先进的计算机资源。不同的软硬件条件很大程度决定了数据库管理系统和应用程序开发工具的选择。例如ORACLE要求的硬件条件就比较高。

4）扩展的需求　充分考虑未来扩展的需要，例如企业未来发展的规模等。这时候可以考虑容量较大的数据库管理系统，如ORACLE、SQL SERVER等。有些企业在进行信息化、网络化改革时是按阶段进行的，因此每一阶段的开发需要考虑和其他阶段开发功能的整合，这也是扩展需求的体现。

5）网络需求　随着Internet技术的发展，企业之间的竞争和联系变得空前紧密，谁先掌握网络化的先机，谁就可以在竞争中占据有利的位置，因此现在焊接数据库应用系统需要考虑网络化的运行环境。网络化的运行模式有客户端/服务器模式，还有浏览器/服务器模式。同时还要考虑网络化运行环境下的并发控制和网络吞吐量，这和网络硬件设施的建设也有相当的关系。

6）安全性要求　由于市场竞争的日益激烈，很多企业都不希望自己多年的经验数据被泄露。因此在有些焊接数据库应用系统设计时要考虑数据的安全性要求。例如，企业一



般把 PQR（焊接工艺评定报告）资料的使用范围局限于研究中心或设计部门，而提供给外界的则是 WPS（焊接工艺指导书）或者工艺规程。对于安全性的要求还有使用权限的问题，此时则需要加入用户权限的控制。

在以上对焊接数据库应用系统进行分析的基础上，进一步需要选择合适的数据库管理系统和应用程序开发工具以进行系统的设计和实现。

2.5.2　数据库管理系统的选择

对于焊接数据库应用系统而言，数据库管理系统的选择主要需要考虑以下方面。

1）数据库的功能　对于不同的企业、不同的运行环境、不同的应用目的，焊接数据库应用系统有着不同的功能要求，从而需要根据实际的功能需求选择数据库系统。例如是否需要处理大规模联机事物、是否需要强大的用户权限管理、是否需要存储二进制的数据等。在需要功能较多的场合，ORACLE、SQL SERVER、DB2 都是比较好的选择。

2）项目成本　焊接数据库应用系统的开发和应用是为企业提高管理和竞争水平的，从而必须考虑焊接数据库应用系统的应用所产生的效益。如果项目成本太高，则可能并不能给企业带来应有的效益。而数据库管理系统的购置费用占相当的比例。目前，ORACLE 和 DB2 购置费用较高，SQL SERVER 相对较低，而 MYSQL 作为开放源代码程序，是完全免费的。

3）操作和使用数据库的难易程度　目前，市场上存在的数据库产品有很多种，且各自有着不同的特点。同时由于实现原理和功能的不同，在操作和使用上也有着不同的难易程度。对于焊接数据库应用系统来说，开发人员大都是从事焊接行业的，因此选择一个较为容易（不损失功能）的数据库系统是比较合适的。比较简单的数据库有 ACCESS、FOXPRO、SQL SERVER 等，当然如果专门学习过 ORACLE 或者 DB2 等数据库知识的人员可能会觉得选择 ORACLE 或者 DB2 比较合适。

4）充分的资源和技术支持　不同的数据库系统在市场上占有不同的份额，从而相应的开发公司会有不同的技术支持。对于焊接数据库应用系统应该选择具有充分技术支持的数据库产品，防止在实际开发过程中由于无法解决的问题而无处寻求帮助。市场份额占有较大的数据库产品使用者也多，会有很多使用者的使用经验和资源流传于各种不同的渠道，因此应该考虑可以较多获得这些经验和资源的数据库产品。ORACLE、DB2、SQL SERVER、ACCESS、FOXPRO 都有着充分的网络资源和技术支持。

5）数据库管理系统的性能分析　主要是分析焊接数据库应用系统的应用要求，例如访问量较多的系统需要较快响应时间和较大的单位时间数据吞吐量，可以方便查看和设置焊接数据库应用系统性能情况，包括内外存使用情况、系统输入/输出速率、SQL 语句的执行、数据库元组控制、参数设定与调整等。SQL SERVER、DB2 和 ORACLE 在这方面做得相当好。

6）网络服务的支持　Internet 发展到今天，要求各种信息管理系统能和 Internet 充分结合，以提供更好的管理和服务。因此如果需要构建应用于网络的焊接数据库应用系统，就需要考虑数据库对网络服务的支持。ORACLE、DB2、SQL SERVER、MYSQL 都有着强大的网络服务功能。

7）和应用程序开发工具的结合　数据库管理系统的选择也需要考虑和应用程序开发工具的结合。每一种数据库管理系统都有与之比较贴近的应用程序开发工具。例如比较适合开发 ORACLE 应用系统的应用程序开发工具有 DELPHI、POWERBUILDER 等；比较适合开发 SQL SERVER 应用系统的前台开发工具有 VB、VC、C# 等。

8）可移植性和可扩展性　焊接数据库应用系统在使用过程中很可能遇到各种变化，包括硬件系统的升级、功能需求的增加等。因此在选择数据库管理系统时需要考虑可移植性和可扩展性。ORACLE、MYSQL 等支持多种硬件平台和操作系统平台。DB2 则只支持 IBM 服务器硬件平台，并支持多种操作系统。SQL SERVER、ACCESS、FOXPRO 则相对只支持 Windows 操作系统平台。

9）容错能力　所有的应用程序在开发过程中都不可能找到所有的错误，因此在实际运行时需要提供一种容错机制。在这方面目前的数据库管理系统都有着自己的容错能力。相对来说，SQL SERVER、ORACLE、DB2 等这些大型数据库系统做得比较好。

10）安全性　在焊接数据库应用系统中有一些数据是需要保密的，同时很多时候也需要区分和限制不同的使用者和使用场合。因此也需要考虑数据库管理系统的安全性。ORACLE、SQL SERVER、DB2、MYSQL 等具有较高的安全性。ACCESS、FOXPRO 的安全性则相对较低。

2.5.3　应用程序开发工具的选择

应用程序开发工具的选择直接关系到开发的焊接数据库应用系统的优劣。而目前存在的各种应用程序开发工具各自有着自己的特点和使用范围。因此，在选择过程中需要注意以下几点。

1）熟悉程度　对于一般的应用，尤其是像焊接数据库应用系统，大部分开发工具都可以实现既定的功能。因此尽量采用自己熟悉的应用程序开发工具进行开发可以起到事半功倍的效果。

2）可视化的开发环境　利用可视化的开发环境可以大大减少界面的设计时间，这样，开发者可以把开发精力主要放在程序逻辑的实现上。VB、VC、DELPHI、POWERBUILDER、Java 等都具有自己可视化的开发环境。相对来说 C 就缺少了这样的环境。

3）和选定数据库系统的配合程度　不同数据库系统都有一些配合较好的应用程序开发工具。例如 ACCESS 和 VB、SQL SERVER 和 VC 等。在选定了数据库管理系统后，应尽量考虑采用配合较好的应用程序开发工具。

4）网络功能和并发控制　如果考虑网络环境下的焊接数据库应用系统，那就需要考虑应用程序开发工具对网络的支持。在这方面，VB、VC、C#、JAVA、ASP、PHP、JSP 等是比较合适的。

5）焊接数据库应用系统的规模　不同的应用程序开发工具都有自己的适应规模。例如，VC、C# 等比较适合大型系统的设计，DELPHI、VB 等比较适合中小型系统的设计，Java 比较适合小型系统的设计。

6）充分的网络资源和技术支持　充分的网络资源和技术支持可以帮助开发者有效地解决开发过程中遇到的困难。VC、VB、C#、DELPHI、Java、ASP 等都有充分的网络资源和技术支持。

7）可移植性和可扩展性　关于可移植性，C#、VB.NET、VC.NET、Java 都是跨平台的，因此有良好的移植性能。可扩展性要求软件程序在开发和使用过程中遇到功能需求变化时，应该可以方便地进行功能的扩充，大部分语言在设计时考虑了这个问题，尤其是 Java 是解释执行的，不需要重新编译就可以达到扩展功能的目的。

8）容错能力和安全性　对于焊接数据库应用系统，在实际运行过程中需要较强的容错能力和安全性，以防止数据的丢失和泄密。VB.NET、C# 和 Java 都有自己的垃圾回收机制，且没有指针，因此容错能力比较强，安全性也比较高。VC 等其他开发工具则需要开发人员在设计时充分考虑容错能力和安全性。



2.5.4 焊接数据库应用系统的设计和开发

在对焊接数据库应用系统进行需求分析，并选择了合适的数据库管理系统和应用程序开发工具后，就可以进行焊接数据库应用系统的设计和开发了。焊接数据库应用系统的设计和开发既需要遵守软件工程的思想和原则，又需要充分考虑用户的需求。焊接数据库应用系统的设计和开发主要包括以下几个方面。

1）数据库结构设计及开发　焊接数据库主要存放焊接信息和生产管理信息，因此需要针对焊接的特点进行设计和开发。首先分析系统中需要处理的所有信息，根据ER方法或者$IDEF_{1X}$建立系统的信息模型，然后转换为数据库的数据模型（如关系数据库中表的形式）。在建立信息模型时需要注意尽可能增大数据库的完备性，适应共享的需要，减少数据的冗余度，采用简单明了的字段命名。

2）界面设计　界面的优劣对焊接数据库应用系统的可使用性、易使用性及使用效率起着决定性作用。随着应用程序开发技术的不断发展，界面设计在整个系统开发过程中占的比例越来越大（约占30%左右）。界面设计包括界面布局、菜单设计等。在进行界面设计时应该充分考虑使用者的习惯，符合一致性（系统中不同的界面应该有相同的风格，以减少使用者的学习负担）、简明性（采用尽可能少的步骤实现用户指定的操作）、指导性（提供良好的联机帮助，帮助使用者对系统的使用）的特点。

3）实现逻辑设计　系统的运行逻辑是保证系统正常运行和实现既定功能的保证。实现逻辑需要根据系统的不同功能作不同的设计。例如，对于焊材查询系统，则有得到用户输入牌号参数、查询数据库、返回具体资料于屏幕的逻辑，同时可能还需要处理打印等操作。实现逻辑的设计在一定程度上也是算法的设计，包括数据库查询算法等。良好的实现逻辑可以提高系统的运行效率。

4）报表设计　焊接数据库应用系统经常需要输出一些报表，以满足企业生产管理的需要，因此报表设计往往在焊接数据库应用系统的开发中占有相当的比重。报表的显示介质可以是屏幕、纸张等，通常应该按照企业原有的报表格式进行设计。进行报表设计时可以充分利用一些应用程序开发工具提供的功能或者第三方控件，例如VB中的Crystal Report可以方便设计各种表格。在进行报表设计时需要考虑众多的实际需要，包括字体、字号、打印机选择等。良好的报表设计可以说是焊接数据库应用系统优劣的标志之一。

5）错误处理　任何一个系统，在设计和运行过程中不可避免地会隐含各种未知的错误，尤其是在系统规模日益扩大的今天。一个好的系统除了尽可能减少错误的产生外，还需要提供一种机制，处理未查出的错误。焊接数据库应用系统可能遇到的错误主要有用户输入错误（例如需要输入数字的地方输入了字符）、算术错误（例如除数为0的情况）、非法文件错误（例如用户指定的文件不存在）等。因此在进行焊接数据库应用系统开发时，应该设计专门的处理程序，以处理碰到的各种未知错误（可以提醒用户改正或者自动纠正等）。

6）帮助设计　一个设计优良的系统必须有一个良好的帮助系统。良好的帮助系统可以帮助使用者解决使用过程中遇到的各种难题。在进行帮助设计时应注意以下几个问题：选择用户使用的语言（尤其多语种环境应该能根据使用者的要求选择合适的语言）；给出实际的例程，以加深用户的理解；具有交互功能，用户可以查询自己需要的资料；实地触发（对于界面不同地方或不同进程调用帮助系统，应该直接给出相关的帮助）。制作帮助程序可以采用数据库形式，也可以采用chm文件等形式。

3 焊工技术档案管理系统

焊工技术档案是包括焊工持证项目记录、平时成绩记录、质量事故记录等反映焊工最新焊接质量状况和水平的各种资料的统称。焊工技术档案的管理是实现焊工管理的基本手段。焊工管理工作在国家压力容器安全监察局的统一管理下，分别由各企业直接进行具体的管理工作（包括焊工资格审查、焊工培训和考核、焊工持证项目的过期管理等）。另外，工程焊接中，持证焊工的焊接质量成绩的统计管理、返修过程的管理等都要对焊工的各种情况进行查询和核对。国家压力容器安全监察局颁布的《锅炉压力容器压力管道焊工考试和管理规则》要求按季度上报焊工的焊接一次合格率，以此来对焊工的焊接质量进行跟踪检查、并作为免试的依据。目前，国内大部分锅炉压力容器及其他石油化工设备的制造、安装和检修单位的焊工管理工作都以《锅炉压力容器压力管道焊工考试与管理规则》为标准。

在许多专门从事焊接生产的企业中，由于焊工人数众多，或涉及的焊接项目众多，以人力为主的管理方法往往满足不了快速、准确地反映焊工资源实际状况的需要。于是往往造成焊工的持证项目过期后而没有及时登记重考或免考；在安排生产时没有某项目合格证的焊工承担了该产品的焊接生产任务。因此，设计一套实用的焊工技术档案管理系统，实现焊工技术档案的计算机管理，充分利用计算机卓越的存储和计算能力和数据库技术的高效管理、检索和统计功能，可以使企业能随时明确自身焊接生产力量的实力，根据市场需求及时作出适当的调整。

3.1 系统需求分析

借鉴国内外类似软件的功能设计，根据国家压力容器安全监察局颁布的《锅炉压力容器压力管道焊工考试与管理规则》并考虑企业实际生产管理中使用的焊工技术档案，本系统应包括如下基本功能。

1）焊工技术档案资料的分类存储　包括焊工资历表（记录焊工从事焊接工作情况）、焊工基本情况表（记录焊工的基本人事资料，包括以往的工作经历）、焊工持证情况记录表（记录焊工持证项目及有效期限）、焊工考试记录表（记录焊工参加理论考试和操作技能考试的成绩）、焊工平时成绩记录（记录焊工日常考核的成绩）、焊工培训记录（焊工所受培训的历史资料）、焊工奖惩记录（焊工获奖或受处罚的历史资料）、焊工质量事故记录（焊工责任事故的历史资料）、焊工免试记录（记录焊工持证项目的免考情况）。

2）焊工技术档案的维护　包括资料的添加、删除、修改。

3）焊工技术档案的检索。

4）各种技术资料信息的汇总和统计　如焊工资源分布统计（统计本系统内的焊工资源，使焊接生产管理者明确生产实力）、焊工持证情况统计（统计本系统内焊工的所有持证项目和分布情况，使焊接生产管理者明确可以接受哪些符合资格要求的生产项目，并如何在本系统内进行生产任务的合理分配）、焊工持证有效期统计（统计一定时效内将要到期的持证项目情况，并显示具体人员、单位、项目名，使管理人员及时安排重考或免考，以避免相应项目焊接资格的丧失）。

5）有关报表的打印　包括空白档案（便于管理人员按一定格式收集整理焊工技术档案信息，存入管理系统）、焊工技术档案（满足管理人员得到部分或全体焊工的部分或全部档案资料硬拷贝的需要）、各种统计和汇总资料的打印。

6）提供操作人员适当的在线帮助信息。



3.2　系统的总体结构

根据上述需求分析确定的系统总体结构如图 7.3-11 所示。系统的开发目标是：以合乎实用为原则，建立合理的数据库表和管理系统，提供友好的用户界面，并有较强的防止用户误操作的能力，适用于在 Windows 环境下对焊工技术档案进行有效的管理。

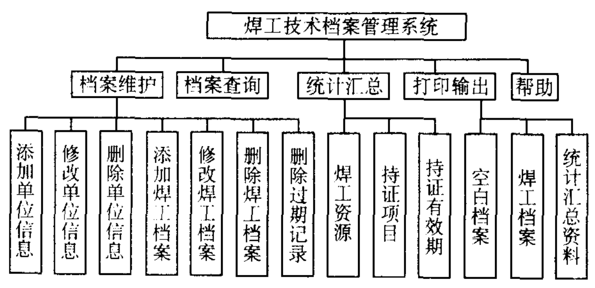


图 7.3-11　焊工技术档案管理系统

Microsoft Access 是在 Windows 环境下运行的数据库管理系统。它不仅是一个良好的数据存储系统，还提供了在 Windows 操作系统下开发应用程序的良好环境，可以通过充分利用已获得的数据来快速建立应用程序。例如，通过定义表单（FORM）和报表（REPORT），并把它们链接起来，就可以建立一个实用的应用程序。用户可以利用宏建造大多数应用程序。对于那些复杂应用程序的构造，可以采用 Access 提供的 Microsoft Access Basic 编写模块函数来实现。

因此对于焊工技术档案管理系统这样一个相对简单的焊接数据库应用系统，Microsoft Access 完全可以满足其应用程序的开发需求。

3.3　数据库结构分析与设计

利用实体－联系（E－R）方法可以获得结构合理的数据库，避免存储空间的浪费或数据之间发生错误的联系。对于焊工技术档案，"焊工"作为实体含有姓名、性别、年龄等属性，而有关其技术档案方面的实体就是各种"记录"，记录中的项目就是其属性，每个焊工只能有一份技术档案，但除了记载焊工基本情况的记录外，像焊工培训这样的记录，一个焊工可能有很多条，从而形成了"焊工"实体和"记录"实体之间的"一对多"的关系。同样"有关单位"实体作为与焊工技术档案中的项目有直接责任关系的部门的集合，与"记录"实体间也存在类似的"一对多"关系。由此可得系统的实体－联系图如图 7.3-12 所示。

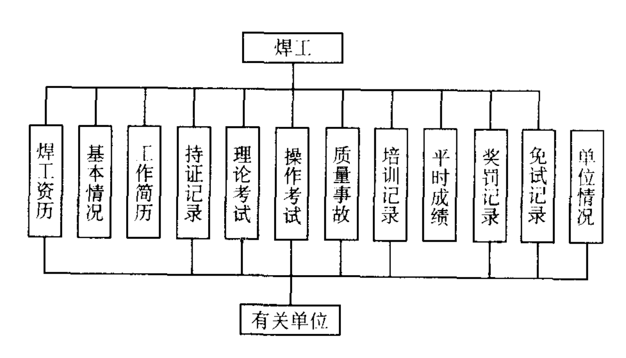


图 7.3-12　焊工技术档案管理 E－R 图

根据图 7.3-12 所示的焊工技术档案管理 E－R 图，系统建立了焊工资历、焊工基本情况、焊工工作简历、持证记录、理论考试成绩记录、操作考试成绩记录、质量事故记录、培训记录、平时成绩记录、奖罚记录、免试记录、有关单位情况等 12 个表，各表包含的字段如表 7.3-11 所示。焊工技术档案以焊工资历表为基础，它与其他焊工档案表之间以焊工登录编号为联系字段；而焊工技术档案各表与有关单位情况表间的联系字段是单位编号。

表 7.3-11　焊工技术档案管理系统中的表及其主要字段

表　名	包含的主要字段
焊工资历	焊工登录编号、焊工姓名、出生日期、性别、钢印号、证件编号、照片文件名、工种、技术等级、工作单位编号、职务、调入时间、开始焊接工作时间、文化程度等
焊工基本情况	焊工登录编号、健康状况、籍贯、民族、政治面貌、婚姻状况、家庭住址、家庭电话号码、居住区邮编、备注等
工作简历	焊工登录编号、工作时间从、工作时间至、工作单位、工种、职务、备注等
持证项目记录	焊工登录编号、考试编号、项目、发证日期、有效期至、发证单位编号、备注等
理论考试成绩	焊工登录编号、理论考试时间、理论考试地点、科目及成绩、考试部门编号等
操作考试成绩	焊工登录编号、操作考试时间、操作考试地点、合格项目、考试部门编号等
质量事故记录	焊工登录编号、事故简述、时间、负责单位编号、备注等
培训记录	焊工登录编号、开学时间、培训天数、考试内容及成绩、主办部门编号、备注等
平时成绩记录	焊工登录编号、项目、检测方法、检测时间、检测总数、返修数、一次合格率、检验员、备注等
奖罚记录	焊工登录编号、奖罚原因、奖罚方式、证书编号、奖罚部门编号、日期等
免试记录	焊工登录编号、免试项目、签证单位编号、签证日期、新有效期至、备注等
有关单位情况	单位登录编号、名称、负责人、单位地址、传真号、电话号码、邮政编码、职能简述、备注等

3.4　面向对象的事件驱动程序设计

面向对象的程序设计将现实世界看作是某个对象，每个对象有一些特性或属性和特定的一组功能。例如对话框中的每个按钮都是一个对象，由显示特性和相应的功能组成。Microsoft Access 支持 Windows 图形界面，使用它可以创建单个或多个表单，每个表单都有可视化的控件对象，包括命令按钮、单选框、复选框、列表框、组合框、正文框和框架等。

Microsoft Access 为表单对象和每个控件选择了一组事件，这些事件被指定属于各种控件的属性。对象对一个事件的响

表 7.3-12　系统中的常用事件

对象	事 件 名	事 件 属 性	事 件 描 述
表单	Open	OnOpen	当打开某表单但在第一个记录显示之前发生
	Load	OnLoad	当某表单被打开且记录被显示时发生
	Activate	OnActivate	当某表单被激活成为当前表单时发生
	Current	OnCurrent	当某表单被打开而且第一个记录被显示但该记录未成为当前记录时发生，当记录指针跳到下一个记录时也发生该事件
	Deactivate	OnDeactivate	当表单被关闭或将光标移动到另一个窗口时发生
	Close	OnClose	当某表单被关闭并且从屏幕上消失时发生
表单记录	Current	OnCurrent	当移动到某记录而该记录显示之前发生
	BeforeUpdate	BeforeUpdate	当输入或修改后的记录被存入基本表之前发生
	AfterUpdate	AfterUpdate	当输入或修改后的记录被存入基本表之后发生

应由特定的函数提供，函数名出现在处理事件的相应属性中。因此通过相关事件的处理程序可以定义表单或控件对象的功能。本系统设计中的一些主要事件如表 7.3-12 所示。

在以面向对象概念为基础的 ACCESS 中，一个表单对象（FORM）就意味着一种功能，若干功能的链接便组成一个完整的操作。以维护功能的实现为例，它常常首先要调用查询功能确定维护对象，在运行上就表现为用于查询的表单和用于维护的表单出现的前后关系。因此本系统功能的实现，以表单（FORM）的设计为主，辅以有关控件被触发时所驱动的事件。

3.5　系统功能的实现

系统实现的主要功能包括资料维护、资料查询、统计浏览和辅助打印。其主界面如图 7.3-13 所示。

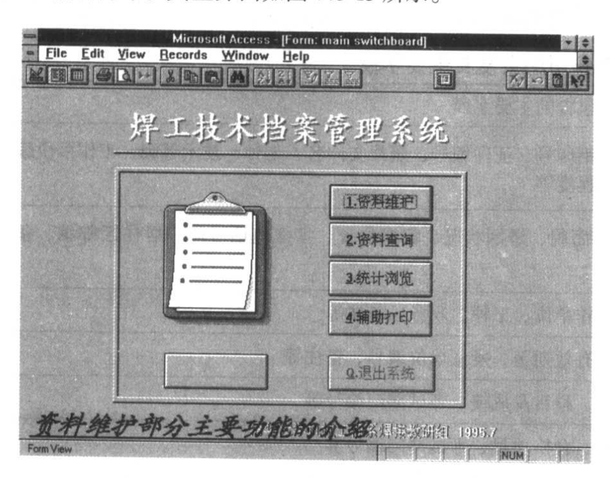


图 7.3-13　焊工技术档案管理系统主界面

3.5.1　资料维护

资料维护功能是对系统中目标焊工的技术档案或目标单位的信息记录进行添加、修改、删除操作。系统提供了包括焊工资历表、焊工基本情况、焊工持证情况记录、焊工考试成绩记录、焊工质量事故记录、焊工培训记录、焊工平时成绩记录、焊工奖罚记录、焊工免试记录等有关焊工档案信息和单位信息的维护界面，并提供选择维护操作类型的界面，如图 7.3-14 所示。

由于进行资料维护操作时，除了添加新记录之外，对已有记录的维护首先要确定维护操作的对象，因此还要涉及用于实现查询功能的界面。焊工技术档案的查询界面如图 7.3-15 所示。在图 7.3-15 中，当用户输入适当的查询条件后，系

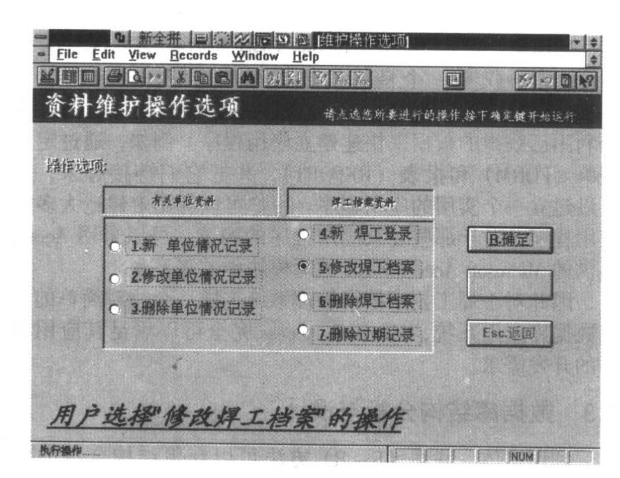


图 7.3-14　焊工档案资料维护类型选择界面

图 7.3-15　焊工技术档案查询界面

统输出对应的查询结果，在用户选定维护对象后即可对相应的档案资料进行修改维护。图 7.3-16 所示为焊工持证项目维护界面。

3.5.2　资料查询

资料查询功能是为最终进行的焊工档案或单位信息的浏览、编辑或打印操作确定目标焊工或目标单位。系统提供了确定目标焊工查询条件对话框、查询结果、目标单位查询并处理和查询并处理过期记录等界面。

目标焊工查询条件对话框与图 7.3-15 进行资料维护时的焊工查询条件界面相同，在用户输入任一查询条件后，系

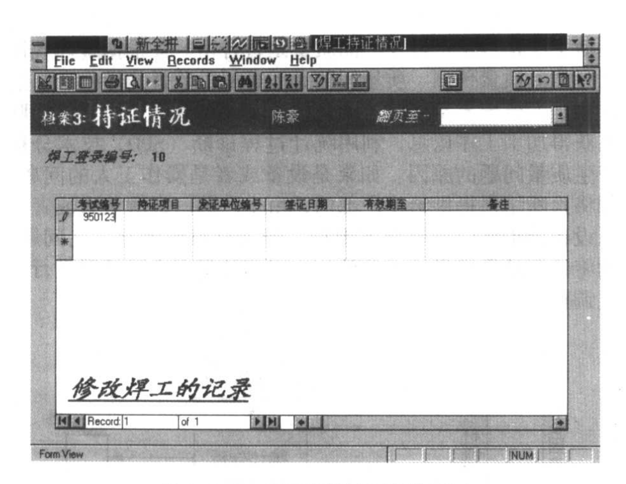


图 7.3-16　焊工持证情况维护界面

统即自动检索并显示结果和统计数目，如输入条件有误则提供警告和建议，同时封锁用户可能产生的误操作。为了避免错误查询条件的输入，系统对某些查询条件采用了可选择的组合框，组合框的数据来源于系统相应记录的非重复值列表。

图 7.3-17 所示为查询获得的某焊工技术档案的封面，用户可以选择跳转到焊工技术档案的任意一页。图 7.3-18 所示为焊工资历页。与资料维护部分不同，在进行资料查询时，对获得的各种档案资料，用户不能进行修改，而只能进行浏览。

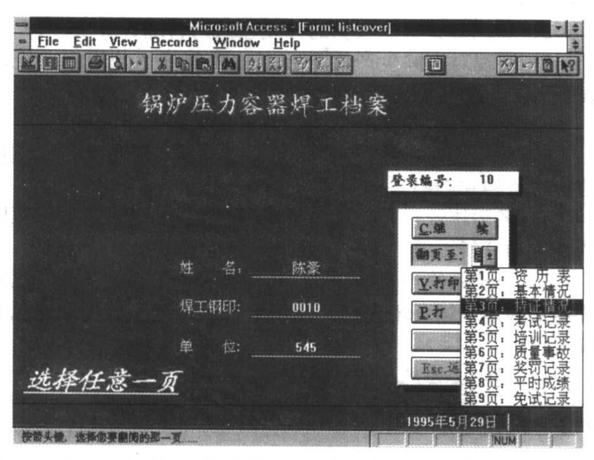


图 7.3-17　焊工技术档案（封面）浏览界面

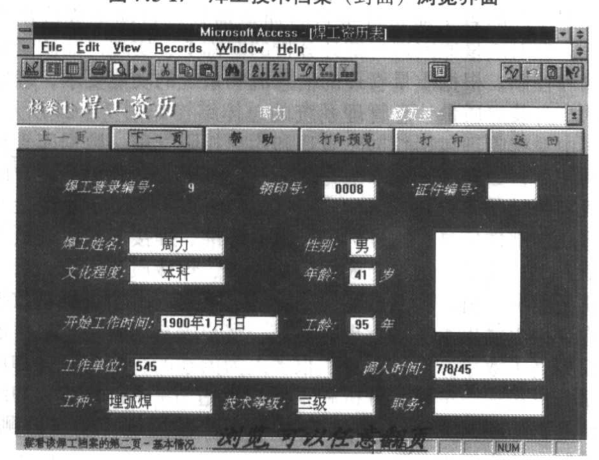


图 7.3-18　焊工资历浏览界面

3.5.3　统计浏览

统计浏览功能用于对系统内的焊工技术档案资料进行统计，为焊接生产管理者提供综合信息。系统提供了统计类型选择、系统内焊工人数和年龄段统计、持证项目类型及分布统计、持证到期情况统计等相关界面。在持证项目类型及分布统计中，统计结果中包括项目的名称、持证人数、在有关单位的分布情况等。图 7.3-19 所示为统计类型选择界面，图 7.3-20 为焊工资源统计结果显示界面。

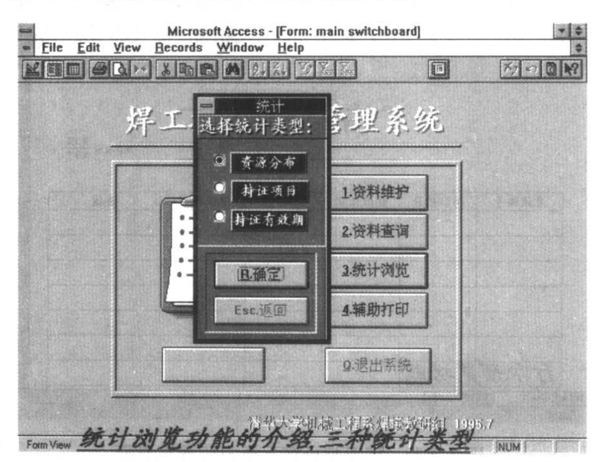


图 7.3-19　焊工技术档案统计类型选择界面

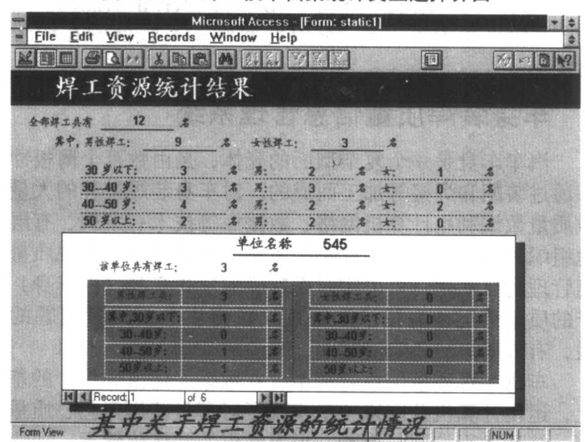


图 7.3-20　焊工资源统计结果显示界面

3.5.4　打印输出

打印输出功能在系统中用于打印三种类型的文档：空白焊工文档、焊工档案、有关单位资料。系统提供了选择文档类型并执行操作的打印类型选择界面，如图 7.3-21 所示。它主要负责确定打印文档的类型，并按照用户的选择结果打开对焊工或单位的查询界面，分配打印任务。

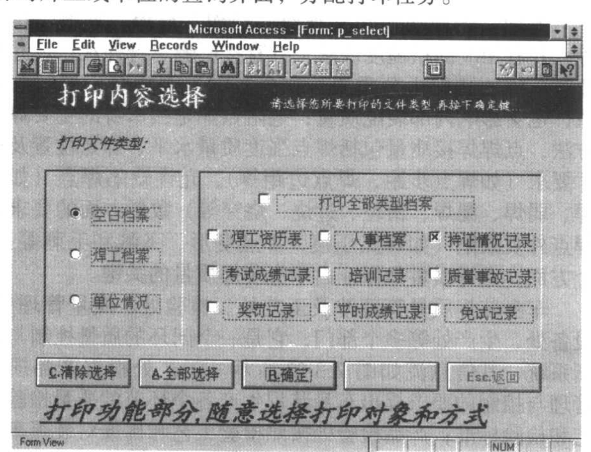


图 7.3-21　系统打印内容选择界面



在打印空白焊工文档或焊工档案时，用户可以选择某些页进行打印或全部进行打印。图 7.3-22 是用户选择打印焊工持证情况时的打印预览界面。

对于系统中的统计汇总结果，用户可在相应结果界面直接进行打印。

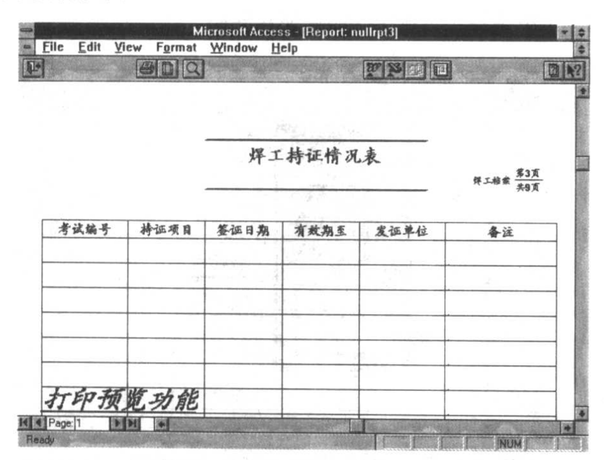


图 7.3-22　焊工持证情况表打印预览界面

此外，为了给使用本软件的用户提供各个功能的使用帮助，系统采用 Help Compiler 设计制作了本软件的在线帮助功能。

4　车身装焊质量信息管理系统

汽车车身是一个复杂型面的壳体，是由数百个薄板冲压件通过装配和焊接等加工而成的。对车身装焊过程的大量离散质量数据利用计算机网络、数据库等技术有条理、有层次地组织和管理起来，提取影响质量的关键因素，实现质量信息管理的自动化，可以实时而准确地反映车身（白车身）生产的质量情况，为技术和管理人员提供分析质量问题的手段，有效缩短故障响应时间，减少故障损失。

车身装焊质量信息管理系统在数据库建模和设计的基础上，运用计算机及网络技术实现了对车身装焊工艺、质量检测、统计过程控制与诊断、报表输出的网络化管理，加快了信息反馈的速度，避免了有效信息的丢失，提高了质量管理的效率和水平。而且采用统计过程控制（SPC）和统计过程诊断（SPD）方法对车身装焊质量进行实时监控、趋势预报和故障原因分析，增强了质量管理的科学性。

4.1　系统需求分析

车身装焊质量一般分为表面质量、尺寸精度和焊接质量三个方面。表面质量包括波纹、凸包、瘪塌、划伤、拉毛等，并有相应的粗糙度要求，它直接影响车身外观；尺寸精度对车身的装配十分重要，它会影响外表质量，如门的间隙，也会影响内部装配质量；电阻点焊是白车身的主要焊接方法，点焊焊接质量包括焊点强度质量水平、焊点位置及尺寸要求（如焊点步距、焊点边距等）、允许缺陷焊点（如虚焊、弱焊、漏焊、错位、过烧、烧穿等）数量方面的要求和焊点外观缺陷（如焊点压痕、焊点变形、飞溅和毛刺等）4 个方面，点焊质量是保证白车身装焊质量的关键。

车身装焊质量管理涉及工艺处、检验处、质量管理处、设备处、生产处等多个部门，它是一个闭环的质量控制与诊断系统，其信息流如图 7.3-23 所示。工艺处根据产品质量管理与控制的要求提出车身装焊生产各个环节的质量检验工艺和检验标准；产品检验处按照检验工艺和标准对装焊车间各个环节的生产质量进行检验，获得实测质量数据；质量管理处对产品的质量检验数据进行统计，形成质量管理报表，判断工序是否稳定以及产品质量是否合格。并根据统计规律进行产品质量预测、质量问题原因分析，监督指导生产制造过程。若出现质量问题，则从检验工序与装焊工序之间的联系获得加工工序信息，利用统计过程诊断（SPD）技术分析产生质量问题的原因。如果是设备或者是操作工人的问题，则将诊断结果提供给生产部门，由生产部门提醒工人或者联系设备维护部门进行设备维护；若是材料或者是工艺问题，则将诊断结果提供给工艺处，由工艺处根据实际情况进行工艺调整。

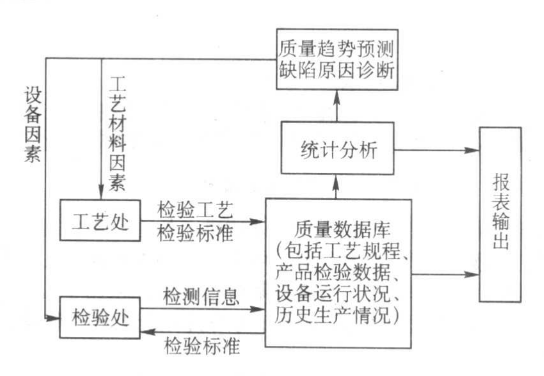


图 7.3-23　质量管理系统的信息流

根据上述分析，车身装焊质量信息管理系统应包括如下主要功能：

1）实现检验工艺和检验标准的编制、增加、删除、修改和报表打印输出等；

2）实现检验实测数据的方便输入与管理；

3）实现对实际生产质量数据的简单统计分析以及统计报表的生成和打印输出；

4）实现直方图、排列图等的自动绘制和打印输出；

5）采用统计过程控制（SPC）技术，实现车身装焊质量的实时监控和趋势预报；

6）采用统计过程诊断（SPD）技术，实现质量故障原因的查找和分析；

7）由于系统涉及企业的不同部门和众多用户，因此系统需要满足网络环境多用户使用的要求，并实现用户角色和权限管理；

8）提供必要的在线帮助功能。

4.2　系统总体结构

本系统的研究开发目标是利用计算机及网络技术对车身装焊生产的各个质量环节进行质量监控、自动生成输出报表；在对质量原因进行统计分析的基础上，实现产品质量预测和控制。根据质量管理的信息流和系统的功能要求，确定的车身装焊质量信息管理系统的总体结构如图 7.3-24 所示。其中系统管理包括数据库管理和用户权限管理，数据库管理利用后台数据库管理系统完成，用户权限管理则根据用户的级别而赋予不同的权限；基本信息包括装焊工序、检验工序、零部件信息、抽样标准、检验标准、焊接参数以及员工信息等；质量实测分为表面质量实测、焊接质量实测、尺寸质量实测，由检验人员在检测现场通过客户端输入质量数据库；报表输出由质量管理处在另一客户端自动定期生成，不仅提高了效率，而且避免了很多人为因素的影响；统计和质量分析包括简单统计分析和采用统计过程控制（SPC）和统计过程诊断（SPD）技术对产品的生产质量进行动态监测、控制和故障原因分析。

由于车身零件和组件数目众多，结构复杂，为便于进行车身质量检测规划、自动测量、测量数据的统计分析、质量监控、质量控制与诊断等计算机辅助信息管理和控制，需要

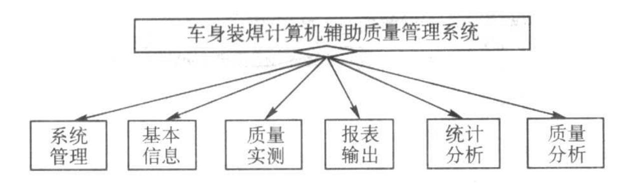


图 7.3-24 系统总体结构

采取一种简便有效的表达手段，来描述车身的结构组成关系、装配关系和装配信息，即建立车身装焊信息数据库。

概念结构设计是数据库设计的关键，它独立于特定的DBMS，也独立于数据库的逻辑结构。对车身装焊来说，其实体包括车身、分总成、合件、组件、零件、焊接质量要求、尺寸质量要求、表面质量要求、检验工艺、焊机、检测设备、夹具、检验工序、焊接检验、尺寸检验、表面检验、装焊工序、抽样标准、焊接质量实测、尺寸质量实测、表面质量实测、焊接参数、员工等。而实体之间的联系主要有组装联系、检验工艺联系、装焊工序联系、操作联系、测量联系等。根据车身装焊的实体和实体之间的联系设计确定的系统总体 E－R 模型如图 7.3-25 所示。

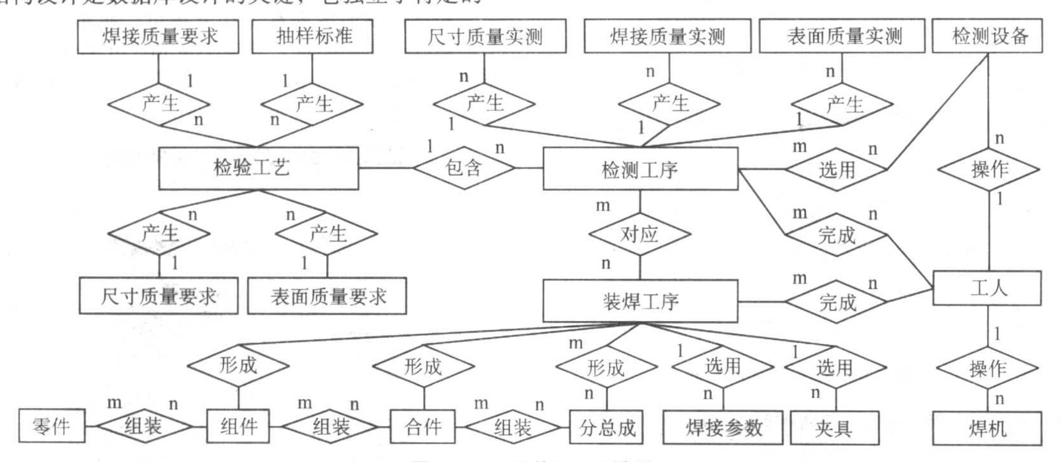


图 7.3-25 总体 E－R 模型

(a) 检验工艺管理

(b) 报表输出

图 7.3-26 检验工艺管理界面

车身装焊数据库的实现即数据库逻辑结构设计就是把概念模式转换为与选用的 DBMS 所支持的数据模型相符合的过程。由于本系统所需存储和处理的数据量很大，因此采用 ORACLE 数据库系统来实现。

由于系统涉及工艺处、检验处、质量管理处等多个部门，因此采用基于 Client/Server（客户机/服务器）模式的分布式结构。系统有一台主服务器，承担系统服务、数据服务和网络服务的功能，运行 Windows 2000 和 ORACLE 8.16。客户端为联网用户所使用的计算机，运行 Windows 98。系统应用程序的开发采用 Visual C＋＋，与数据库的访问接口采用微软的 ADO 访问技术，它通过使用相应应用平台上和所需数据库对应的驱动程序与应用程序的交互来实现对数据库的操作，避免了在应用程序中直接调用与数据库相关的操作。数据库中主要存储装焊车间的基本信息、工艺信息和实测质量数据，数据库的设计充分反映了整个车身的结构和装焊生产的有机关系，有利于车身质量控制和诊断。

4.3 基本功能模块

系统的基本功能包括检验工艺管理、检验实测数据输入、报表输出以及用户权限管理等。

4.3.1 检验工艺管理

检验工艺由工艺处制定，并根据实际生产的需要进行修改和调整。检验工艺管理包括增加、删除、修改和报表打印输出等（图 7.3-26）。

4.3.2 检验实测数据输入

检验实测包括表面质量检验、焊接质量检验（图 7.3-27）、尺寸质量检验。质量检验人员根据质量计划和检验项目进行检验，并将检验结果提交到数据库。在检验界面上给出由检验工艺部门确定的每一个检验项目的检验标准，以便于正确输入检验数据。

4.3.3 报表输出

报表输出是质量信息管理系统的重要环节，可由质量管理人员定期自动生成。由于 VC6 没有集成报表生成工具，因此本系统的报表输出采用 Seagate 公司的 Crystal Report 实现。

系统的输出报表包括基本信息报表和统计信息报表两类。基本信息报表采用报表与数据库绑定的方法，如图 7.3-26 中的检验工艺报表输出。统计信息报表则采用参数传递的方法，程序对数据库中的质量信息进行统计，然后传递到报表中。图 7.3-28 和图 7.3-29 分别为统计信息报表选择界面和报表格式。

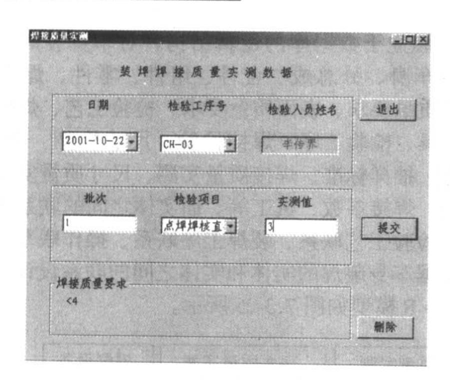


图 7.3-27 焊接检验实测界面

缺陷定期汇总表

检验工序号: CH-01　批次:

工 序 名　左侧围　开始时间: 2002-05-22

○ 生产批次　⊙ 测量时间　中止时间: 2002-05-22

确定　取消

图 7.3-28 缺陷定期汇总报表选择界面

装焊车身工序不合格项次统计表

统计时间: 2001-03-18—2001-03-22

工序名称	左侧围	检验员盖章（签字）	
序号	质量缺陷名称	频次	备注
1	表面凸	21	
2	毛刺飞溅	11	
3	表面划伤	12	
4	表面凹	18	
5	止口不平	17	
6			

图 7.3-29 统计报表输出

4.3.4 用户权限管理

该系统涉及质量处、工艺处、检验处等。质量处负责总体质量分析与监控，主要用户有系统管理员、质量统计分析员、质量负责人等。质量统计分析员进行质量统计分析和报表输出，而质量负责人只能看到各种分析结果和报表，系统管理员具有最高权限以及数据库管理权限。装焊车间进行各种质量检验数据的输入以及所属车间工段的生产统计结果分析，主要用户有表面检验输入、尺寸检验输入、焊接检验输入、装焊统计结果与报表输出等。工艺处负责检验工艺和标准的制定，主要用户是检验工艺制定和调整人员。

用户权限管理在 Oracle 数据库安全管理机制的基础上，通过设立权限管理数据库实现，其前台程序包括用户管理和角色管理两部分。系统对所有客户端按工作性质分类，分别授予不同的用户角色，对不同的用户角色，根据其使用的数据源，分别授予不同的数据库对象存取权限。为了明确区分质量管理处、工艺处和检验处的职能，系统把用户分成质管组、工艺组和实测组。

用户管理界面如图 7.3-30 所示，左面显示用户组和组拥有的角色，右边显示用户的具体信息。由于用户和角色是多对多的关系，所以添加和删除用户时都要判断是否已经存在此用户。用户可以修改密码，但是不能修改账号，要修改账号则需要将用户删除，再重新添加用户账号。

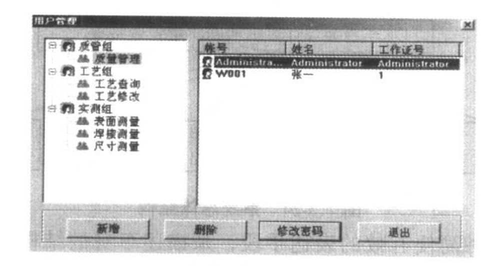


图 7.3-30 用户管理界面

系统根据需求设置了如下角色：质量管理、工艺查询、工艺修改、表面测量、焊接测量和尺寸测量，而且在实际应用中根据需要可以增加或删除角色，还可以修改角色的基本权限。角色管理界面如图 7.3-31。

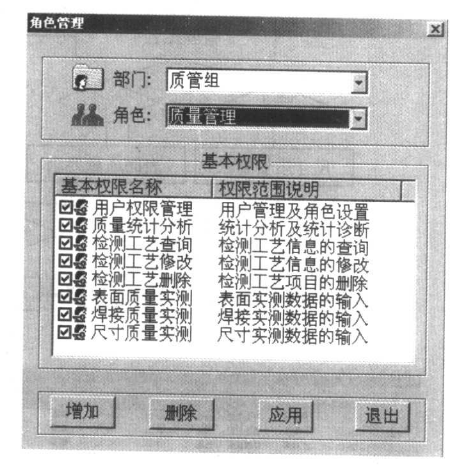


图 7.3-31 角色管理界面

4.3.5 联机帮助

帮助系统采用 HTMLhelp 格式（图 7.3-32），其左侧包括目录、索引、搜索和书签四个可相互切换的窗格（可选）；右侧显示主题文档的内容；工具栏则采用浏览器的导航格式。用户可随意选择目录主题进行浏览，而且随时可以知道正在阅读文档的哪一部分。

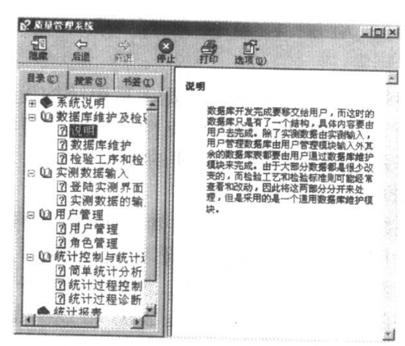


图 7.3-32 联机帮助

4.4 工序质量统计分析与过程控制和诊断

工序质量统计分析与过程控制和诊断是以预防为主的质量预测和控制方法，它借助统计学的手段对工序生产质量进行分析和评价，并采取相应措施来达到控制质量的目标。质量统计方法分为两类，一类是反应质量数据在某段时间内的静止状态，称为简单统计分析，如直方图、排列图等。另一类是反映质量数据随时间变化规律的动态方法，也就是基于控制图的统计过程控制（Statistical Process Control，简称 SPC）与统计过程诊断（Statistical Process Diagnosis，简称 SPD）。

工序质量统计分析与过程控制和诊断需要绘制大量的图



表，而MFC没有直接提供这样的类。ActiveX控件简单实用，界面统一，可以加速程序开发的进程，目前在VC中实现绘制图表有两种常用的ActiveX控件：MSChart和TeeChart。MSChart20.ocx（6.0版），是Visual Studio 6.0自带的ActiveX控件之一，Tee Chart Pro ActiveX 5.0是西班牙Steema SL公司开发的图表类控件。

4.4.1 直方图

直方图为直角坐标系中若干顺序排列的矩形，它表示数据分布的形态，便于对数据的总体分布特征进行分析和推断以及评价质量水平。装焊尺寸质量可以采用直方图进行统计分析。

直方图的绘制界面如图7.3-33所示。首先选择尺寸质量的检验工序和检验项目，然后根据实际情况选择生产批次或者测量时间，只要有足够的数据量就可以自动绘制出直方图，据此可进行装焊尺寸质量数据的统计分析。同时可以选择将直方图打印输出或者将统计数据进行输出。

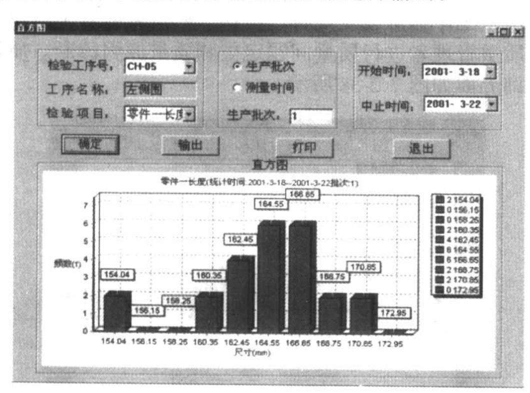


图7.3-33 直方图绘制主界面

4.4.2 排列图

排列图是找出影响产品质量主要因素的图表工具，在质量管理中是发现主要质量问题和确定质量改进方向的有力手段。排列图由两个纵坐标、一个横坐标、几个直方形和一条曲线构成。左方纵坐标表示频数，右方纵坐标表示频率。横坐标表示影响质量的各项因素，按影响程度的大小自左至右顺序排列。各直方形的高度表示该因素影响的大小，折线则表示各影响因素逐项累计所得频数和频率。

排列图的绘制界面如图7.3-34所示。选择表面质量或焊接质量检验工序，可以按照生产批次或者测量时间来绘制排列图，然后进行统计分析。同时可以选择将排列图或者将统计数据打印输出。

4.4.3 统计过程控制（SPC）

任何生产过程，无论如何精确设计和精心维护，总存在着一定量的固有的或自然的变化，它是由许多偶然因素形成的偶然波动的累积效果。由于这种波动比较小，可以认为生产过程处于受控状态或称为稳态。然而，在实际生产过程中，有时也会发生由异常因素造成的异常波动，如由于设备

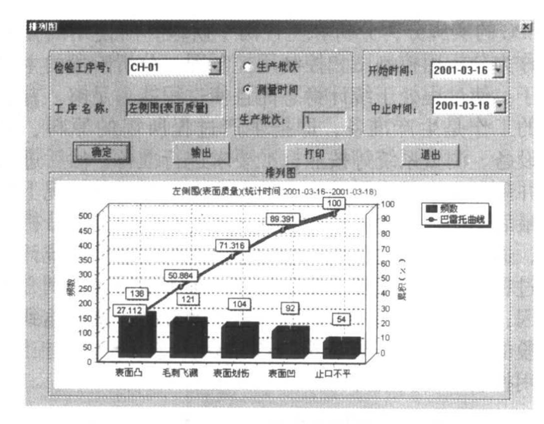


图7.3-34 排列图绘制主界面

调整不当、人为差错或原材料的缺陷而导致的质量波动，与偶然波动相比这种异常变化要大得多，而且往往表现一定的趋势和规律，此时就认为生产过程处于失控状态。

令 W 为度量某个质量特性的统计样本，假定 W 的均值为 μ_W，而 W 的标准差为 σ_W。于是，控制图（图7.3-35）的中心线CL、上控制限UCL和下控制限LCL分别为：

$$\begin{cases} UCL = \mu_W + K\sigma_W \\ CL = \mu_W \\ LCL = \mu_W - K\sigma_W \end{cases}$$

式中，K 为中心线与控制界限之间的用标准差为单位所表示的间隔宽度。正常情况下点子分布是正态的，落在控制界限之内的概率远大于落在控制界限之外的概率。反之，若点子落在控制界限之外，则可能是属于正常情况下的小概率事件发生，也可能是过程异常发生，相对来讲，后者发生的概率要大得多。因此，我们宁可认为是后者情况发生。这就是控制图的统计学原理。

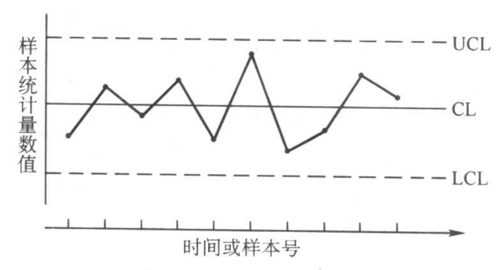


图7.3-35 SPC控制图

统计过程控制技术的重要应用是各种类型的控制图，它已经成为生产现场直接研究质量数据随时间变化的统计规律的动态方法，成为变事后检验为事前预防的一个重要工具。根据质量数据的类型，控制图可分为：计量值控制图、计件值控制图和计点值控制图，应根据所控制质量指标的情况和数据性质分别加以选择。适用于车身装焊质量控制的各种控制图见表7.3-13。

表7.3-13 常用控制图

数据类型	分布形态	控制图名称	适用对象
计量值	正态分布	均值-极差控制图（$\bar{X}$-R 控制图）	用于控制对象为长度、质量、强度、纯度、时间和生产量等计量值的场合。适合车身装焊尺寸质量管理 当样本容量小于10时，采用均值－极差控制图，当样本容量等于或大于10时采用均值-标准差控制图
		均值-标准差控制图（$\bar{X}$-S 控制图）	
计点值	泊松分布	缺陷数控制图（c控制图）	用于控制一部机器、一个部件、一定的长度、一定的面积或任何一定的单位中所出现的缺陷数目，如铸件上的砂眼数，机器设备的故障数等等。适合车身装焊生产表面质量和焊接质量管理

SPC的实施分为分析和监控两个阶段，所使用的控制图分别称为分析用控制图和控制用控制图。分析阶段的主要目的在于：使过程处于统计稳态而且使过程能力足够。首先要进行的工作是生产准备，即把生产过程所需的原料、劳动力、设备、测量系统等按照标准要求进行准备；然后进行生产，并确保生产是在影响生产的各要素无异常的情况下进行的；最后用生产过程收集的数据计算控制界限，做分析用控制图，进行过程能力分析，检验生产过程是否处于统计稳态以及过程能力是否足够。如果任何一个不能满足，则必须寻找原因，进行改进，并重新进行生产及分析，直到达到了分析阶段的两个目的，则分析阶段结束，进入SPC监控阶段。分析用控制图的实现界面如图7.3-36所示。

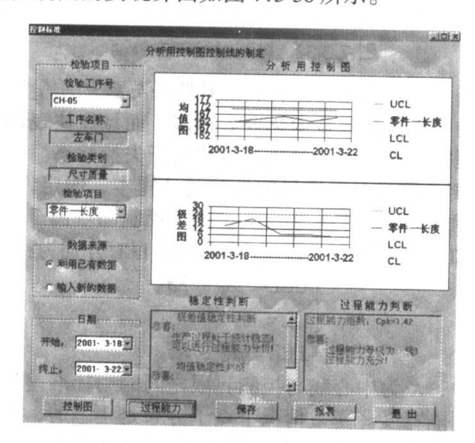


图7.3-36　分析用控制图界面

监控阶段的主要工作是使用控制用控制图对生产进行监控。此时控制图的控制界限已经根据分析阶段的结果而确定，将生产过程的数据及时绘制到控制图上，并密切观察控制图，控制图中点的波动情况可以显示出过程是否受控或失控。如果发现失控，则必须寻找原因并尽快消除其影响。监控充分体现出SPC预防控制的作用。控制用控制图的实现界面如图7.3-37。

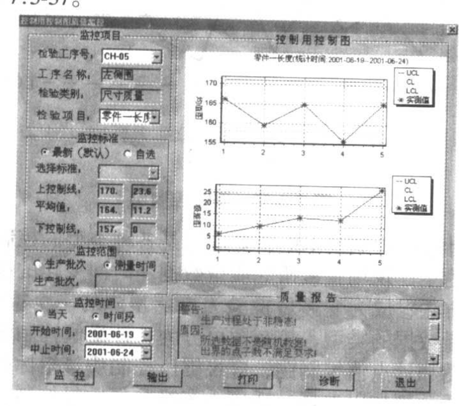


图7.3-37　控制用控制图

控制用控制图的状态分析与分析用控制图的分析基本类似，但是加上了一些预警功能，如出现链状数据的分析：当连续出现5点在中心线一侧时，应注意其发展状况，当连续出现6点时应开始调查原因，当连续出现7点时，则判断为异常状态，应采取措施加以解决。

在工厂的实际应用中，对于每个控制项目，都必须经过以上两个阶段，并且在必要时会重复进行上述从分析到监控的过程。控制用控制图不是永远不变的，使用一段时间后应根据实际质量水平对中心线和控制界限进行修改。

4.4.4　统计过程诊断（SPD）

车身装焊质量问题一般是在总成以及分总成阶段反映出来，在对装焊质量问题进行分析与诊断时，与装焊顺序相反，总成阶段反映出来的质量问题有时需要追溯到分总成、合件、组件及零件。因此，首先应分析总成的装焊过程对质量的影响，若不是总成的原因，则再考虑分总成和组合件的装焊过程对质量的影响，如果仍没有问题则进一步分析是否零件本身的原因。这样采取层层分析的方法最终即可找到质量缺陷的成因。影响车身装焊质量的因素很多，如夹具、点焊设备的工作状态和点焊参数的稳定性、操作人员的情绪等，要对质量进行有效的在线监控和诊断，必须找出与质量密切相关的信息，并进行有效的组织和归纳，将车身零部件及该零部件的有关资料与检验信息有机的组合起来，将质量问题与加工方法、机器、操作人员、材料及环境对应起来，以便于质量缺陷或异常原因的分析、诊断和控制。系统应用时，首先由检测工序获得实测质量数据，然后对这些数据进行统计分析，来判断工序是否稳定以及产品质量是否合格。若出现质量缺陷问题，则从检验工序与装焊工序之间的联系获得加工工序信息以及设备、材料、操作者的有关信息，提供给质量管理者进行质量问题定位和质量原因诊断。质量问题查询界面如图7.3-38所示。

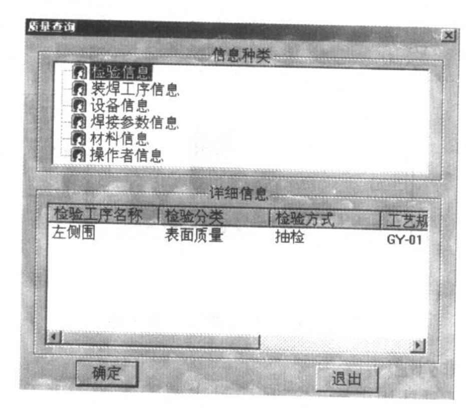


图7.3-38　质量查询界面

现行关于产品质量的概念包括两部分，一是本道工序自身的加工质量，另一个是上道工序对本道工序的影响，正是后者将上下道工序连在了一起，分不清楚责任。张公绪将上道工序对本道工序的影响称为上影，并将与上影有关的现行质量称为总质量，而将与上影无关的本道工序自身的加工质量称为分质量。在这两种质量中，总质量即大家日常所谓的质量，分质量是指工序本身的固有加工质量，而与上道工序无关。

一条生产线往往由若干道工序组成，若要诊断一条生产线，首先要将整个生产线分解成若干个基本单元，然后针对每个基本单元进行诊断。由于每道工序都要受到上道工序的影响，故这个基本单元应由相邻的两个工序组成（图7.3-39）。休哈特控制图的实质是区分两类质量因素：偶因与异因，这里的异因是指全部异因的集合，故从控制全部异因集合的角度来看，休哈特控制图也可以称之为全控图。选控图的实质是区分三类质量因素，即偶因、欲控异因和非控异因，它能够只对欲控异因告警，而对非控异因在图上则不予反应，譬如工业生产中的上影。

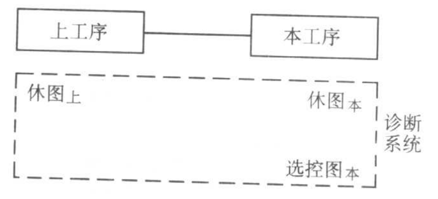


图7.3-39　三图诊断系统



在图 7.3-39 的三图诊断系统中，每张控制图都有两种状态，即正常状态和异常状态。于是，图 7.3-39 的三张图通过排列组合共有 8 种典型情况（表 7.3-14）。由表可以看出，若无两种质量诊断理论，而在生产线的各工序只使用休图，则根据 2、3、6、7 可知，将发生虚报与漏报的错误。

选控图的中心问题是“选控”，选控图只选择欲控异因加以控制，而在图上对非控异因则不予反映。为了在选控图上除去非控异因的影响，在建立选控图时需要找出控制对象-质量指标（y）与非控异因（x）的函数关系。对于单因素选控情况：

$$y = f(x)$$

从理论上讲，只要上影（x）对下道工序质量指标（y）的影响是显著的，则上述函数关系是存在的，具体找出此函数一般有理论推导法、分析法和经验法。对于车身装焊质量控制能够采用的有效方法是分析法，这是根据实际数据的分布情形，选择适当的回归数学模型，然后再对其中的待定系数进行估计的方法。在得到回归模型后，还要联系实际，进行深入的分析，以得到合理的解释；否则如果与实际矛盾，那么所得到的模型仍然不能应用。

三图诊断系统的核心是控制图的应用，对于休哈特控制图参见上节所述，而选控图则一般是采用简单有效的选控单值－选控移动极差控制图（$x_{cs} - R_{scs}$）。在完成本工序选控图、本工序休图、上道工序的休图后，则可以根据三八表进行工序质量统计过程诊断，其界面如图 7.3-40 所示。

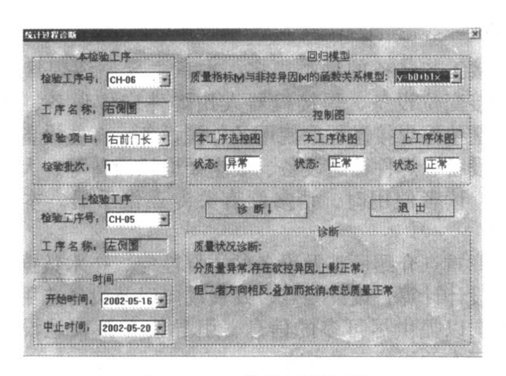


图 7.3-40　统计过程诊断

表 7.3-14　两种控制图诊断的三八表

典型情况	上道工序全控图	下道工序全控图	下道工序选控图	诊　　断
1	异常	异常	异常	分质量异常，存在欲控异因，上影也异常，存在非控异因
2	异常	异常	正常	分质量正常，上影异常，存在非控异因
3	异常	正常	异常	分质量异常，存在欲控异因，上影也异常，存在非控异因，但二者方向相反，叠加而抵消，使总质量正常
4	异常	正常	正常	分质量正常，上影异常，存在非控异因，但二者方向相反，叠加而抵消，使总质量正常
5	正常	异常	异常	分质量异常，存在欲控异因，上影正常
6	正常	异常	正常	分质量正常，上影也正常，但是二者方向相同而叠加，使总质量异常
7	正常	正常	异常	分质量异常，存在欲控异因，上影正常，但二者方向相反，叠加而抵消，使总质量正常
8	正常	正常	正常	分质量、上影和总质量均正常

编写：朱志明（清华大学）

第 4 章　焊接工艺装备

1　概论

焊接工艺装备的种类很多，本章主要介绍焊接工装夹具、焊接变位设备、焊接机器人用焊件变位设备、导电装置、焊剂垫等焊接过程中使用的外围设备。有些设备像焊接热处理设备、焊件输送设备、吸尘及通风设备等，大都是通用设备，读者使用时，请参阅有关专业性手册，本章将不涉及。

本章重点介绍所涉及设备的主要性能、技术数据、使用场合、设计计算、设计要点、发展动向以及设备选用的注意事项等，以提供尽可多的信息，引导读者正确地设计、选择、使用有关焊接工艺装备。

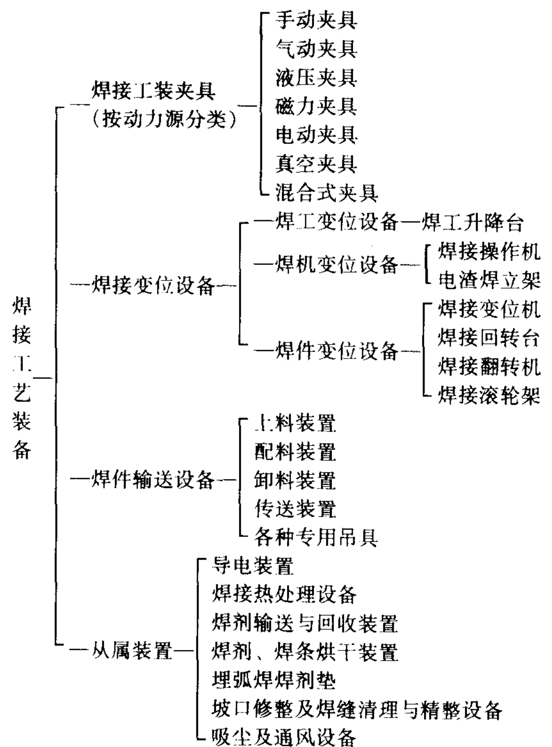
1.1　焊接工艺装备的组成及分类

焊接工艺装备是焊接结构生产用设备的组成部分之一，它是在焊接生产中与焊接工序相配合，实现焊接作业机械化、自动化，保证和提高装焊质量，促使焊接生产过程加速进行的各种装置和设备。它相对于焊机而言，是处于辅助地位的，因此又称辅具和辅机。

焊接工艺装备包括的范围较广，主要有焊接工装夹具、焊接变位设备、焊件输送设备三个方面，其次还有导电装置、焊剂输送回收装置、坡口修整及焊缝清理与精整装置等，它们又是焊接工艺装备的从属装置。

焊接工艺装备的详细分类见表 7.4-1。

表 7.4-1　焊接工艺装备分类



许多焊接工艺装备在国内外均有专业化的厂家生产，有的已标准化、系列化，用户一般以选用为主，只有市售产品不能满足焊接工艺要求时，才设计制造非标准的装备。选用焊接工艺装备时，要考虑选用性能先进、使用方便、安全可靠、经济合理、节约能源、有利环保、便于维修、与生产纲领相匹配、有适量裕度的产品。同时还要考虑到符合工艺发展的方向，要尽量选用国产标准装备，还要拒绝选用国家明文规定的淘汰装备。

1.2　焊接工艺装备在焊接生产中的作用

焊接工艺装备对焊接生产的有利作用有如下几个方面。

1）采用焊接工装夹具，零件由定位器定位，不用划线，不用测量就能得到准确的装配位置，从而保证了装配精度，加快了装焊作业的进程。此外，在焊接工装夹具上大都采用液压、气动夹具，即使采用手动夹具，也具有扩力性能，因此可减轻工人的体力劳动，提高装焊效率。

2）由于焊件在夹具中可强行夹固或预先给予反变形，所以能控制或消除焊接变形。

3）采用焊接工装夹具后，由于保证了装配精度，控制了焊接变形，所以可提高焊件的互换性能，焊件上的配合孔、配合槽等机械加工要素可由原来的先焊接后加工改为先加工后焊接，从而避免了大型焊件焊后加工所带来的困难，有利于缩短焊件的生产周期。

4）采用焊件变位设备，可缩短装配和施焊过程中焊件翻转变位的时间，减少辅助工时，提高焊机利用率和焊接生产率。

5）采用焊件变位设备可使焊件处于最有利的施焊位置——水平及船形位置上进行焊接。有利于操作，有利于保证焊接质量，而且可加大焊接工艺规范，充分发挥焊接方法的效能。

6）采用焊件变位设备可扩大焊机的焊接范围。例如，埋弧焊机配合相应的焊接装备后，就可完成内外环缝、空间曲线焊缝的焊接和空间曲面的堆焊。

7）采用焊接工艺装备后，可使手工操作变为机械操作，人仅处于控制机械的地位，减少了人为因素对焊接质量的影响，也可降低对焊工操作技术水平的要求。

8）采用焊接工艺装备后，可使装配和焊接集中在一个工位上完成，减少工序数量，节约车间使用面积。

9）只有与焊接工艺装备相配合，才能在条件困难、环境危险、不宜由人工直接操作的场合实现焊接作业。例如在高温、深水、剧毒、有放射性的环境中进行焊接作业，都需要与相应的焊接工艺装备相配合才能实现。

10）欲使焊接工序本身实现机械化和自动化，或者使焊接生产过程实现综合机械化、自动化，都需要焊接工艺装备的配合才能实现。

总之，焊接工艺装备对焊接生产的有利作用是多方面的。总括而言，就是保证焊接质量，提高焊接生产率，改善工人的作业条件，实现机械化、自动化焊接生产过程四个方面。因此，无论在焊接车间或是在施工现场，焊接工艺装备已成为焊接生产中不可缺少的装备之一，从而获得了广泛的应用。

1.3　焊接工艺装备的设计原则和应注意的问题

焊接工艺装备的设计原则与其他机械的设计原则一样，首先必须满足工作职能的要求，在这个前提下还应满足操作、安全、外观、经济上的要求。也就是说，应该按照适用、经济、美观的原则来设计焊接工艺装备。

根据这一原则设计焊接工艺装备时，先根据工作职能要



求，确定装备的工作原理，选择机构和传动方式（液压、气动、磁力、电力、机械），然后在运动分析的基础上进行动力分析，确定机构各部分传递的功率、转矩和力的大小，根据这些数据和使用要求进行强度、刚度、发热、效率等方面的计算或校核，使设计出的装备能在给定的年限内正常工作。

另外，在考虑满足职能要求的同时，要注意取得较好的经济效果，使设计出的装备成本低，动力消耗及维修费用少，能满足给定的生产效率。

装备的经济性可按式（7.4-1）评估

$$A_j + W_j + F_j + J/N < A_0 + W_0 + F_0 \qquad (7.4\text{-}1)$$

式中，A_j，W_j，F_j 分别为采用装备后进行单个焊件装配、焊接、机械加工工序的费用；A_0，W_0，F_0 分别为未用装备进行装配、焊接、机械加工工序的费用；J 为装备制造费用；N 为采用装备制造的焊件数。

满足式（7.4-1），焊接装备的制造和使用才有经济性。

设计方案的好坏，对装备的技术、使用性能以及经济上的合理性有着至关重要的作用，为此，要慎重地确定设计方案（对重要装备，从方案的论证分析到最后确定，一般要占设计时间的1/3左右），要注意整体结构的合理性和动作的协调性，装备的零件要有良好的加工工艺性能，要合理地选用原材料，尽量采用标准化的零部件等。

最后，要特别注意操作简便、安全、可靠。对一些外露的运动部件，要有防护设施，尽量减少各种危险因素。对于大型的焊接装备还要考虑通风、防尘、防辐射等设备的配置，尽量减少影响焊工身体健康的危害因素。

以上是焊接工艺装备设计的一般原则。但在具体进行设计时，由于焊接工艺装备的特点，还应处理好以下一些问题。

1）在焊接过程中，往往会有熔融金属的飞溅，这些金属小颗粒若落在装备的定位和安装基面上，就会影响焊件的装配精度；落在装备的传动机构上，就会加速传动零件的磨损；若飞溅积累过多，还会导致传动机构的失效。另外，焊接工艺装备如果密闭性不好，焊件铁锈等脏物以及焊剂、焊渣也容易进入装备内部而引起机件的磨损。因此设计焊接工艺装备时，应使整个设备具有较好的密闭性，特别是定位基面、滑道、传动机构等应有可靠的防护。一些定位和安装基面无法密封时，应布置在飞溅区之外或者在施焊部位采取遮挡措施。

2）焊接工艺装备往往是焊接电源二次回路的组成部分，因此施焊时，装备上各传动机件的啮合处容易起弧，特别是当焊接工艺装备边运转边施焊时，起弧现象更易发生。为了避免因起弧而发生工作表面的烧损，应设法使二次回路的一端从离焊件最近的地方引出，力戒焊接电流从装备周身流过。对于要求边施焊边运转的焊接工艺装备，还应设置专用的导电装置。

3）在焊接工艺装备的传动系统中，应具有反行程自锁性能，也就是当驱动力取消后，装备的传动系统不因焊件自重或装备机件自重的作用而倒转或因夹紧反力的作用而松夹。为此，在焊接工装夹具、焊接变位设备、焊件输送设备的传动系统中必须设有一级具有自锁性能的传动。这样做，不仅有利于安全操作，而且有利于装备的定位和节能。

4）焊接过程也是装备局部受热的过程，为了减少装备因受热而引起的变形，装备本身应具有较好的传热性能，应能将焊件上的热量尽快地传递出去。对于大型的焊接工艺装备，因其工作台面较大，散热条件较好，只要增加焊件和工作台面的接触，就有利于将焊件上的热量通过工作台面散走。对于小型的焊接工艺装备，由于工作台面不大，散热面积小，不仅不利于传热，而且本身会因过热而变形，在这种情况下，应采用水冷措施或者用导热性能较好的材料来制作工作台面。

5）焊接工艺装备应具有良好的通风条件，能使焊接烟尘很快地散走。为此，在大型的焊接工艺装备上，应安装通风设备或抽气罩。

6）焊接工艺装备的结构形式应有利于将积聚在其上的焊渣、焊剂、金属飞溅物、铁锈等杂物方便地清除出去。

7）焊接工艺装备不能影响施焊工艺的实施，要保证焊接机头具有良好的焊接可达性。

8）焊接工艺装备上的夹紧机构，不应当由于焊接变形产生的阻力使夹紧机构松夹时不能复位。

9）当设计用于厚大件的焊接工艺装备时，为了避免起弧处产生未焊透，收弧处出现气孔、收缩裂纹等缺陷，应注意在焊缝始末端分别设置引弧板和引出板。

10）设计焊接工艺装备的控制系统时，应处理好焊件启动、停止与焊机起弧、收弧的顺序关系。若设计用于多个焊接机头作业的焊接工艺装备时，除应处理好上述关系外，还应注意处理好焊枪之间的工作同步性和协调性。

由于焊接工艺装备包括的范围相当广泛，设计时应注意的问题很多。这些问题对每种装备来说也不尽相同，上述注意事项，仅是设计大多数焊接工艺装备时应注意的共性问题。

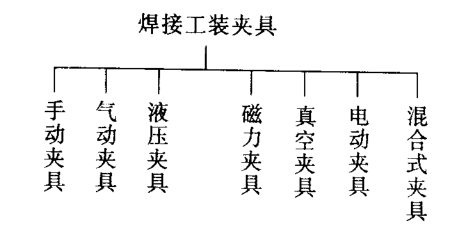
2　焊接工装夹具

2.1　焊接工装夹具的分类与组成

焊接工装夹具是将焊件准确定位并夹紧，用于装配和焊接的工艺装备。

在焊接结构生产中，装配和焊接是两道重要的生产工序，根据工艺通常以两种方式完成这两道工序，一种是先装配后焊接；一种是边装配边焊接。我们把用来装配以进行定位焊的夹具称作装配夹具；专门用来焊接焊件的夹具称作焊接夹具；把既用来装配又用来焊接的夹具称作装焊夹具。它们统称为焊接工装夹具。

焊接工装夹具按动力源分为七类：



一个完整的夹具，是由定位器、夹紧机构（又称夹紧器）、夹具体三部分组成的。在装焊作业中，多使用在夹具体上装有多个不同夹紧机构和定位器的复杂夹具（又称为胎具或专用夹具）。其中，除夹具体是根据焊件结构形式进行专门设计外，夹紧机构和定位器多是通用的结构形式。

定位器大多数是固定式的，也有一些为了便于焊件装卸，做成伸缩式或转动式的，并采用手动、气动、液压等驱动方式。夹紧机构是夹具的主要组成部分，其结构形式很多，且相对复杂，驱动方式也多种多样。在一些大型复杂的夹具上，夹紧机构的结构形式有多种，而且还使用多种动力源，有手动加气动的、气动加电磁的等等。这种多动力源夹具，称作混合式夹具。

在先进工业国家里，对广泛采用的一些夹紧机构以至定位器已经标准化、系列化。我国也有几个厂家和公司，以自己的品牌生产并供应手动、气动、液压等夹紧机构，其中以杠杆－铰链式的为多，并形成各自的标准和系列，还有个别

公司供应磁力夹紧机构。设计时，应尽量选用。

2.2　焊接工装夹具的特点

焊接工装夹具的特点，是由装配焊接工艺和焊接结构的形式决定的，与机床夹具比较有如下特点。

1）由于焊件一般由多个简单零件组焊而成，而这些零件的装配和定位焊，在焊接工装夹具上是按顺序进行的，因此，它们的定位和夹紧是一个个单独进行的。而机床夹具是对一个待机械加工的整体毛坯进行一次定位和夹紧。

2）在焊接过程中，零件会因焊接加热而伸长或因冷却而缩短。为了减少或消除焊接变形，要求工装夹具能对某些零件给予反变形或者做刚性的夹固；为了减少焊接应力，又要允许某些零件在某一方向可以自由伸缩。因此，焊接工装夹具不是对所有的零件都做刚性的夹固。

机床夹具则不然，除少数加工细长件的夹具，如加工光杠、丝杠用的顶尖，要考虑工件机械加工时的热变形对其做游动夹固外，其他夹具均对工件做刚性夹固。

3）对机床夹具而言，加工后的工件，尺寸减小，质量减少，更便于从夹具上取下。对焊接工装夹具而言，装焊完的结构，尺寸增大，质量增加，形状变得复杂，增加了从工装夹具上卸下的难度。

4）对用于熔焊的夹具，工作时主要承受焊件的重力、焊接应力和夹紧力，有的还要承受装配时的锤击力，用于压焊的夹具还要承受顶锻力。而机床夹具主要承受工件的部分重力和切削力，且此切削力远远小于焊接工装夹具所承受的各种力。

5）与机床夹具不同，焊接工装夹具往往是焊接电源二次回路的一个组成部分，因此绝缘和导电是设计中必须注意的一个问题。例如，在设计电阻焊用的夹具时，如果绝缘处理不当，将引起分流，使接头强度降低。但对机床夹具而言，除电加工所用夹具外，不存在导电和绝缘的问题。

6）焊接工装夹具一般比机床夹具大。装配夹具和装焊夹具上的夹紧点、定位点比机床夹具上的多达几倍甚至十几倍，因此，设计难度较大，特别是定位点、夹紧点的数量、选位和两者的对应关系，都会影响夹具的功能和定位、夹紧的质量。

7）焊接工装夹具主要用来保证焊接结构各连接件的相对位置精度和整体结构的形状精度，而机床夹具主要用来保证零件的加工精度。

8）除精密焊件所用的夹具外，一般焊接工装夹具本身的制造精度，以及对焊件的定位精度均低于机床夹具的相应指标。

以上八点是焊接工装夹具与机床夹具的主要不同之处，设计焊接工装夹具时，要充分考虑这些区别，使设计出来的夹具满足使用要求。

2.3　对焊接工装夹具的设计要求

1）焊接工装夹具应动作迅速、操作方便，操作位置应处在工人容易接近、最宜操作的部位。特别是手动夹具，其操作力不能过大，操作频率不能过高，操作高度应设在工人最易用力的部位，当夹具处于夹紧状态时，应能自锁。

2）焊接工装夹具应有足够的装配、焊接空间，不能影响焊接操作和焊工观察，不妨碍焊件的装卸。所有的定位元件和夹紧机构应与焊道保持适当的距离，或者布置在焊件的下方或侧面。夹紧机构的执行元件应能够伸缩或转位。

3）夹紧可靠，刚性适当。夹紧时不破坏焊件的定位位置和几何形状，夹紧后既不使焊件松动滑移，又不使焊件的拘束度过大而产生较大的应力。

4）为了保证使用安全，应设置必要的安全联锁保护装置。

5）夹紧时不应损坏焊件的表面质量，夹紧薄件和软质材料的焊件时，应限制夹紧力，或者采取压头行程限位、加大压头接触面积、加添铜、铝衬垫等措施。

6）接近焊接部位的夹具，应考虑操作把手的隔热和防止焊接飞溅物对夹紧机构和定位器表面的损伤。

7）夹具的施力点应位于焊件的支撑处或者布置在靠近支撑的地方，要防止支撑反力与夹紧力、支撑反力与重力形成力偶。

8）注意各种焊接方法在导热、导电、隔磁、绝磁等方面对夹具提出的特殊要求。例如，凸焊和闪光焊时，夹具兼作导电体，钎焊时夹具兼作散热体，因此要求夹具本身具有良好的导电、导热性能。再如，真空电子束焊接所使用的夹具，为了不影响电子束聚焦，枪头附近的夹具零件不能用磁性材料制作，夹具也不能带有剩磁。

9）用于大型板焊结构的夹具，要有足够的强度和刚度，特别是夹具体的刚度，对结构的形状精度、尺寸精度影响较大，设计时要留有较大的裕度。

10）在同一个夹具上，定位器和夹紧机构的结构形式不宜过多，并且尽量只选用一种动力源。

11）工装夹具本身应具有较好的制造工艺性和较高的机械效率。

12）尽量选用已通用化、标准化的夹紧机构以及标准的零部件来制作焊接工装夹具。

13）对于安装在焊件变位设备上的夹具，其夹具体与变位设备工作台面的连接要有互换性。根据需要设有接电、接水、接气、接油的快速接头，使夹具能便捷地安装到变位设备上。

14）在设计大型动力驱动的多个夹紧机构组成的复杂夹具时，其电控回路的设计要满足施焊程序的要求，各夹紧机构之间要实现逻辑控制，并根据需要设置与焊件变位设备、焊接执行装置、焊接机器人的通讯接口。

15）考虑到夹具长期使用中不可避免的磨损，夹具上的定位器、夹紧机构根据需要可实现一维至三维的可调，以保证夹具的使用精度。

16）当设计用于生产线上的夹具时，其生产节拍要与生产线的节拍相匹配，以保证生产有节奏地进行。

17）当设计生产批量很大的生产线上使用的各种夹具时，例如汽车车身装焊生产线上的夹具，从经济性、可靠性、互换性出发，可采用模块化设计的新理念。其一是将夹具的定位器、夹紧机构（夹紧器）以至组成它们的零件予以分类归并，进行模块化的设计，然后以此模块为基础拼装成各种夹具；其二是从可靠性出发，为了保证装焊精度，对随行夹具而言，确定统一的焊件定位点，进行统一的标准化的支座（夹具体）、随行托盘及其定位销的设计。

2.4　焊接工装夹具设计方案的确定

确定工装夹具方案时，夹具的合理性和经济性是主要考虑的因素。当焊件的焊接方法及工艺确定后，所选夹具结构，首先要能保证焊接工艺的实施。同时，焊件结构尺寸以及组成焊件坯料的制作工艺和制造精度，则是确定夹具定位方法、定位基准和夹紧机构方案的重要依据。除此之外，还应考虑经济上的因素，使夹具的制造、使用费用最低而取得的经济效益最大。由于上述各因素都不是孤立存在的，它们之间往往有联系又有制约，所以在确定夹具方案时要对上述各因素进行综合分析，只有全盘考虑，才能制定出最佳的设计方案。具体确定设计方案时，应联系以下几个方面进行考虑。

1）焊件的整体尺寸和制造精度以及组成焊件的各个坯



件的形状、尺寸和精度　其中，形状和尺寸是确定夹具设计方案、夹紧机构类型和结构形式的主要依据，并且直接影响其几何尺寸的大小；制造精度是选择定位器结构形式和定位器配置方案以及确定定位器本身制造精度和安装精度的主要依据。

2）装焊工艺对夹具的要求　例如与装配工艺有关的定位基面、装配次序、夹紧方向对夹具结构提出的要求。再如，不同的焊接方法对夹具提出的要求，像埋弧焊，可能要求在夹具上设置焊剂垫；电渣焊要求夹具保证能在垂直位置上施焊；电阻焊要求夹具本身就是电极之一等。最后，还要考虑夹具是否需要具备预制反变形的功能。

3）装、焊作业可否在同一夹具上完成，或是需要单独设计装配夹具和焊接夹具　这往往与下述因素有关。

① 在装焊夹具上，焊件的所有焊缝能否在最有利的施焊位置上焊完。

② 从装配夹具上取下装配点定好位的焊件时，是否会破坏各零件的相互位置。例如，若焊件刚性不好，则会发生整体变形，甚至定位焊点发生开裂，使已装配好的零件发生位置变化。

③ 装配时不需要使焊件翻转变位，而在焊接时，则需要使焊件翻转变位，这样，若采用装焊夹具方案，是否会使夹具结构复杂化。

④ 装配夹具，其定位器和夹紧机构较多，若用于焊接，是否影响焊接机头的焊接可达性；焊接夹具，为了防止焊件变形，虽具有较大的刚度和强度，但用于装配时能否承受装配时的锤击力是主要问题。

⑤ 装、焊作业若在同一夹具上完成，能否合理地组织装配工人、焊接工人相互协调作业。

⑥ 车间的作业面积和起重运输设备的负荷能力是否允许装配和焊接作业分别在各自的夹具上进行。

4）夹具的柔性　是指夹具适应焊件形状、尺寸变化的能力。对用于大批量生产、产品比较稳定的夹具，多设计成高效省力的专用夹具；对用于小批量、多品种、产品更新换代快的夹具，多设计成具有通用性能的柔性夹具；介于二者之间的夹具，多使用在有一定批量、焊件形状相近、几何尺寸有限变化的场合。因此，需设计成有限柔性的夹具。总之，无论设计成哪种夹具，都要使夹具的结构方案和性能与产品的产量以及生产条件相匹配、相适应。

2.5　焊件所需夹紧力的构成及计算

在进行焊接工装夹具的设计计算时，首先要确定装配、焊接时焊件所需的夹紧力，然后根据夹紧力的大小、焊件的结构形式、夹紧点的布置、安装空间的大小、焊接机头的焊接可达性等因素来选择夹紧机构的类型和数量，最后对所选夹紧机构和夹具体的强度和刚度进行必要的计算或验算。

装配、焊接焊件时，焊件所需的夹紧力，按性质可分为四类：第一类是在焊接及随后的冷却过程中，防止焊件发生焊接残余变形所需的夹紧力；第二类是为了减少或消除焊接残余变形，焊前对焊件施以反变形所需的夹紧力；第三类是在焊件装配时，为了保证安装精度，使各相邻焊件相互紧贴，消除它们之间的装配间隙所需的夹紧力，或者，根据图样要求，保证给定间隙和位置所需的夹紧力；第四类是在具有翻转或变位功能的夹具或胎具上，为了防止焊件翻转变位时在重力作用下不致坠落或移位所需的夹紧力。

上述四类夹紧力，除第四类可用理论计算求得与工程实际较接近的计算值外，其他几类，则由于计算理论的不完善性、焊件结构的复杂性、装配施焊条件的不稳定性等因素的制约，往往计算结果与实际相差很大，对有些复杂结构的焊件，甚至无法精确计算。因此，在工程上往往采用模拟件或试验件进行试验的方法来确定夹紧力，它的方法有两种。一种是经试验得到试件焊接残余变形的类型和尺寸后，通过理论计算，求出使焊件恢复原状所需的变形力，此力就是焊件所需的夹紧力。这种方法，对于梁、柱、拼接大板等一些简单结构的焊件还比较有效，计算出的夹紧力与工程实际较接近；但对于复杂结构的焊件，例如机座、床身、大型内燃机缸体、减速机机壳等焊接机器零件，计算仍然是困难的。另一种方法是在上述试验的基础上，实测出矫正焊接残余变形所需的力和力矩，以作为焊件所需夹紧力的依据。

焊件所需夹紧力的确定方法，要随焊件结构形式不同而异。所确定的夹紧力要适度，既不能过小而失去夹紧作用，又不能过大而使焊件在焊接过程中的拘束作用太强，以致出现焊接裂纹。因此在设计夹具时，应使夹紧机构的夹紧力能在一定范围内调节，这在气动、液压、弹性等夹紧机构中是不难实现的。

下面，就一些简单焊件夹紧力的确定方法作一叙述。

2.5.1　板材焊接时夹紧力的确定

板材，特别是薄板，在焊接过程中易出现波浪变形或局部的圆形或椭圆形的鼓包，在一些中厚、薄板的对接焊中，易在焊缝附近形成凹陷使整个板面扭曲变形。

对板材的圆形鼓包（图7.4-1），可看成周边固定的板材在均布载荷 q 作用下所形成的弯曲板，其中心的挠度

$$f=\frac{qr^4}{64C} \tag{7.4-2}$$

式中，q 为均布载荷，且 $q=\frac{F}{\pi r^2}$；F 为作用在板材上的压力；r 为鼓包半径；C 为板材的圆柱刚度，且 $C=\frac{E\delta^3}{12(1-\nu^2)}$；$E$ 为板材的弹性模量；δ 为板材厚度；ν 为板材的泊松比，取 $\nu=0.3$。

将 q 值和 C 值代入式（7.4-2）后，经变换得

$$F=\frac{18fE\delta^3}{r^2} \tag{7.4-3}$$

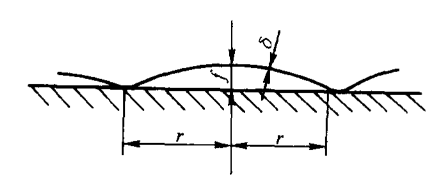


图7.4-1　薄板的鼓包式变形

若通过实验测得板材变形后的 f、r 值，即可利用式（7.4-3）计算出 F 值，此值就是所需的夹紧力。因为式（7.4-3）是在弹性力学基础上得出的，若夹紧后的应力超过屈服点，此式的应用便失去了意义。为此，还要验算板材鼓包中心的应力

$$\sigma=\frac{3}{8}\frac{qr^2}{\delta^2}(1+\nu) \tag{7.4-4}$$

若将 $q=\frac{F}{\pi r^2}$、$\nu=0.3$ 代入式（7.4-4）得

$$\sigma=\frac{0.15F}{\delta^2} \tag{7.4-5}$$

再将式（7.4-3）代入式（7.4-5）得

$$\sigma=\frac{2.8fE\delta}{r^2} \tag{7.4-6}$$

由式（7.4-6）可根据鼓包的实测尺寸算出板中的应力值 σ。若该应力超过屈服点 σ_s，则此时的夹紧力 F_s 可利用式（7.4-5）并将 σ 置换成 σ_s 后得到

$$F_s=\frac{\sigma_s\delta^2}{0.15} \tag{7.4-7}$$

在实际夹紧装置上，按式（7.4-3）或式（7.4-7）算出的夹紧力并不是均匀地分布在整个鼓包上，而是分布在沿被焊坡口长约鼓包直径的两段平行线上（例如，在琴键式夹具中就是如此），此时，可近似认为，每单位坡口长度的计算夹紧力

$$F_d = \frac{F}{4r} = 4.5fE(\frac{\delta}{r})^3 \tag{7.4-8}$$

同理，若 $\sigma > \sigma_s$ 时，则每单位坡口长度的计算夹紧力为

$$F_{ds} = \frac{F_s}{4r} = \frac{\sigma_s \delta^2}{0.6r} \tag{7.4-9}$$

例如，两块板材，$\delta = 5$ mm，$E = 206\ 000$ MPa，$\sigma_s = 235$ MPa，对接焊后出现鼓包如图 7.4-1 所示，$r = 450$ mm，$f = 13$ mm，为防止产生此种变形，求在单位坡口长度两边所需施加的夹紧力。

按式（7.4-6）先算出板中可能出现的应力

$$\sigma = \frac{2.8 \times 13 \times 20\ 6000 \times 5}{450^2}\ \text{MPa} = 185\ \text{MPa}$$

由于该值小于板材的 σ_s，故按式（7.4-8）计算单位坡口长度的夹紧力

$$F_d = 4.5 \times 13 \times 206\ 000\ (\frac{5}{450})^3 = 16.5\ \text{MPa·mm} = 16.5\ \text{N/mm}$$

实际上，在中厚、薄板 V 形坡口的对接焊中，还可能出现图 7.4-2 所示的“屋顶式”角变形。为防止此种变形，焊接时应对板材施以弯矩 $M = FL$（图 7.4-2），其中 L 为夹紧点至坡口中心线的距离，是与板厚、焊接方法以及材质有关的量，一般情况下，板越薄，L 越小。此弯矩在焊缝中心所形成的应力应限定在屈服点 σ_s 以内，按照这一要求，焊缝上每单位长度的最大允许弯矩

$$M_{ds} = \sigma_s \times W \tag{7.4-10}$$

式中，W 为焊缝单位长度的抗弯截面系数，可近似认为 $W = \frac{\delta^2}{6}$。

考虑到单位长度最大允许弯矩 $M_{ds} = F_{ds}L$，则根据式（7.4-10）得到每单位长度允许施加的最大夹紧力

$$F_{ds} = \frac{\sigma_s \delta^2}{6L} \tag{7.4-11}$$

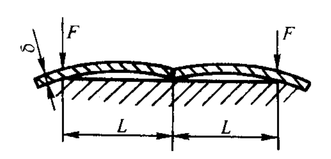


图 7.4-2 “屋顶式”角变形

例如，两板材对接，$\delta = 5$ mm，$\sigma_s = 235$ MPa，夹紧点距坡口中心线的距离 $L = 45$ mm。为防止“屋顶式”角变形，坡口每边单位长度允许施加的最大夹紧力可由式（7.4-11）算出

$$F_{ds} = \frac{235 \times 5^2}{6 \times 45} = 21.8\ \text{MPa·mm} = 21.8\ \text{N/mm}$$

在上述计算中还应注意，由于焊接参数和板材本身刚度的不同，板材在自由状态下进行对接焊时发生的“屋顶式”角变形数值也不同，如果角变形超过某一临界值 α_c，即使在以 F_{ds} 力夹紧的状态下施焊，仍会有角变形产生。这应认为是合理的，因为对焊件过度的刚性夹紧，将会导致裂纹的产生。因此，在设计夹具时，还应检查一下在所给定的夹紧状态下，有无出现角变形的可能，其变形值是否在工程允许的范围之内。

如图 7.4-3 所示，若焊件在夹紧状态下焊后出现角变形，其大小也可用夹紧点处的间隙 Δ 来反映。

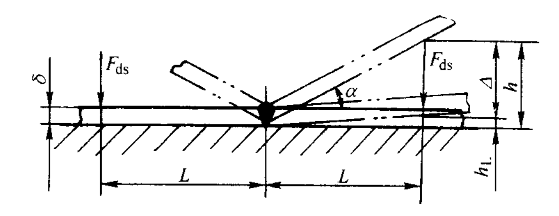


图 7.4-3 板材对接角变形示意

$$\Delta = h - h_L$$

式中，h 为板材在自由状态下焊后出现的间隙；h_L 为板材在坡口每边单位长度允许施加的最大夹紧力 F_{ds} 作用下，所能抵消的最大间隙。

显然，若 $h_L > h$ 则不会出现间隙，若 $h_L < h$ 将形成间隙，其值

$$\Delta = h - h_L = L\tan\alpha - \frac{F_{ds}L^3}{3EJ} \tag{7.4-12}$$

式中，J 为板材单位长度的惯性矩，$J = \frac{\delta^3}{12}$；α 为板材在自由状态下焊后出现的角变形。

例如，$\delta = 5$ mm 钢板在自由状态下对接焊时，测得角变形 $\tan\alpha = 0.01$，现拟在琴键式夹具中进行对接焊，夹紧点距坡口中心的距离 $L = 45$ mm，每单位坡口长度施加的最大夹紧力 $F_{ds} = 21.8$ N/mm，验证能否出现间隙 Δ。

根据式（7.4-12）

$$\Delta = \left[45 \times 0.01 - \frac{21.8 \times 45^3}{3 \times 206 \times 10^3 \times \frac{5^3}{12}}\right]$$

$$= 0.45 - 0.31 = 0.14\ \text{mm}$$

根据计算，在夹紧点处可出现 0.14 mm 的间隙，这样小的间隙，反应到两边的坡口上，仍可认为板材是紧贴在工艺垫板上的，同时该间隙的存在还可避免裂纹的产生，因此在工程上是允许的。

根据式（7.4-12），也可计算出 $\Delta = 0$ 时所需的坡口每边单位长度施加的夹紧力

$$F_d = \frac{E\delta^3 \tan\alpha}{4L^2} \tag{7.4-13}$$

但应用式（7.4-13）时，应保证 $F_d < F_{ds}$，即焊缝中产生的 $\sigma < \sigma_s$。

前已述及，板材在自由状态下对接时，其角变形存在一个临界值 α_c，超过此值，即使在夹紧状态下施焊，仍会有角变形产生。此角变形的临界值，可从式（7.4-11）和式（7.4-12）并以 $\Delta = 0$ 为条件推出其计算式

$$\tan\alpha_c = \frac{F_{ds}L^2}{3EJ} = \frac{2L\sigma_s}{3E\delta}$$

例如，厚 $\delta = 2$ mm 的板材在琴键式夹具中对接，$\sigma_s = 235$ MPa，$E = 206\ 000$ MPa，施力点距坡口中心的距离为 40 mm，则其临界角变形

$$\tan\alpha_c = \frac{2 \times 40 \times 235}{3 \times 206 \times 10^3 \times 2} = 0.015\ 2$$

实测角变形 $\tan\alpha = 0.01$，小于临界角变形，所以应根据式（7.4-13）将 $\tan\alpha$ 值代入，求出琴键式夹具坡口每边单位长度所需的夹紧力。

在板材对接时，若夹头与板材、板材与夹具体垫板之间的摩擦力不足以克服板材热胀冷缩所形成的变形力时，则在焊接加热与冷却过程中，坡口间隙会发生张开至合拢的变化。坡口间隙的变化，将影响焊接质量，应予避免，但不应采取增加夹紧机构拘束力的办法来解决。通常是在焊缝始末端用工艺连接板焊牢或沿坡口长度进行定位焊的方法来解决。

2.5.2 梁式构件焊接时所需夹紧力的确定

梁式结构易出现的焊接变形是纵向弯曲变形、扭曲变形和翼缘因焊缝横向收缩形成的角变形。

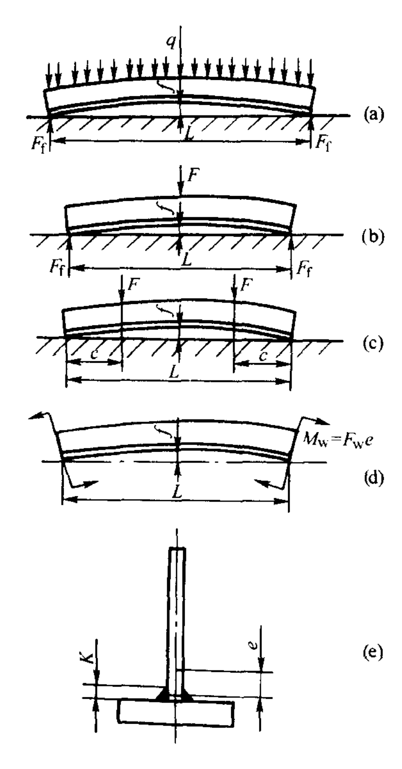


图 7.4-4 焊接 T 形梁的纵向变曲

如图 7.4-4d 所示的 T 形梁，焊后出现纵向弯曲，它是因焊缝纵向收缩产生的弯矩作用而形成的。该弯矩可用下式表达

$$M_w = F_w e$$

式中，F_w 为焊缝纵向收缩力，N，单面焊时，$F_w = 1.7DK^2$，双面焊时，$F_w = 1.15\times1.7DK^2$；K 为焊脚尺寸，mm，见图 7.4-4e；D 为工艺折算值，埋弧焊时 $D = 3\ 000$ MPa，焊条电弧焊时 $D = 4\ 000$ MPa；e 为梁中性轴至焊缝截面重心的距离，mm，见图 7.4-4e。

梁在弯矩 M_w 作用下，呈现圆弧形弯曲，其弯曲半径

$$R_w = \frac{EJ}{M_w} \tag{7.4-14}$$

梁中心所形成的挠度

$$f_w = \frac{M_w L^2}{8EJ} = \frac{F_w eL^2}{8EJ} \tag{7.4-15}$$

为了防止焊缝纵向收缩而形成梁的纵向弯曲变形，在大多数梁用焊接夹具中都装有成列的相同夹紧机构，其夹紧作用如同焊接梁上作用着均布载荷 q（图 7.4-4a），使梁产生与焊接变形相反的挠度 f 以抵消 f_w。f 的大小可用下式表示

$$f = \frac{5}{384}\frac{qL^4}{EJ} \tag{7.4-16}$$

根据式（7.4-15）和式（7.4-16）以及考虑到 f 应等于 f_w，则可求出均布载荷 q，也即防止梁焊接弯曲变形所需的夹紧力

$$q = \frac{384fEJ}{5L^4} = 9.6\frac{F_w e}{L^2} \tag{7.4-17}$$

例如，一 T 形梁（图 7.4-4a），长度 $L = 6$ m，腹板截面尺寸为 10 mm × 600 mm，翼板截面尺寸为 10 mm × 300 mm，焊脚尺寸 $K = 8$ mm，梁中性轴至焊缝截面重心的距离 $e = 196$ mm，采用多点夹紧，进行双面埋弧焊，求其单位长度夹紧力 q。

根据所给条件，焊缝纵向收缩力

$$F_w = 1.15\times1.7DK^2 = 1.15\times1.7\times3\ 000\times8^2 = 375.4\ \text{kN}$$

根据式（7.4-17）求出单位长度夹紧力

$$q = 9.6\frac{F_w e}{L^2} = 9.6\times\frac{375\ 400\times196}{6\ 000^2}\ \text{N/mm} = 19.6\ \text{N/mm}$$

求出 q 值后，很容易算出夹具所需的夹紧力总和

$$F_h = qL = 19.6\times6\ 000\ \text{N} = 117.6\ \text{kN}$$

同时也可算出夹具两端的支撑反力

$$F_f = \frac{F_h}{2} = 58.8\ \text{kN}$$

F_f 值即可作为夹具体强度、刚度的计算依据。

需要指出的是，在弯矩和 q 分别作用下，梁所呈现的纵弯变形是不相同的，前者接近圆弧状，可由单一曲率半径来描述，见（式 7.4-14），而后者则否，通常要用沿梁长度方向各点的挠度来描述

$$f_x = \frac{q}{24EJ}\ (2Lx^3 - x^4 - L^3x)$$

式中，x 为距梁一端的距离。

然而，弯矩和均布载荷使梁产生的纵向弯曲变形尽管不同，但相差不是很大，其对应点的挠度相差不大于 1% ~ 5%。所以用同样的方法计算夹紧力在工程上是可行的。

对于较短的梁，夹紧方案可成图 7.4-4b、c 的形式。

若按图 7.4-4b 布置夹紧力，则梁中心的挠度

$$f = \frac{FL^3}{48EJ} \tag{7.4-18}$$

考虑在数值上 $f = f_w$，并将式（7.4-15）代入式（7.4-18），得到所需夹紧力的公式

$$F = \frac{6F_w e}{L} \tag{7.4-19}$$

若按图 7.4-4c 布置夹紧力，则梁中心的挠度

$$f = \frac{Fc}{24EJ}\ (3L^2 - 4C^2) \tag{7.4-20}$$

同理，也可得到所需夹紧力的公式

$$F = \frac{3F_w eL^2}{c(3L^2 - 4c^2)} \tag{7.4-21}$$

以上讨论了 T 形梁焊接时的夹紧力计算，现在再来讨论一下工字梁焊接时夹紧力的计算。工字梁是由四条纵向角焊缝将腹板与上、下翼板连接在一起的。由于施焊方案的不同，所需夹紧力的计算方法也不同。一种方案是先将工字梁用定位焊装配好，然后将其上的四条角焊缝一次焊成。例如，利用四头 CO_2 焊接专用设备对工字梁进行焊接，就是采用了这种方案。由于焊缝和截面的对称性，从理论上讲，这种施焊方案不会产生工字梁的纵向弯曲，因此夹紧的目的不是为了防止变形，而是为了使腹板与上、下翼板接触得更加严实。这种因装配所需的夹紧力，属于前面所述的第三类夹紧力。另一种方案是对定位焊装配好的工字梁，先焊下翼板上的两条角焊缝，然后翻转 180°，再焊上翼板上的两条角焊缝。例如用两台角焊缝专用埋弧焊小车对工字梁进行焊接，就是采用了这种方案。此时所需的夹紧力，可根据梁的长度及夹紧力的布置方案，分别按式（7.4-17）、式（7.4-19）和式（7.4-21）计算。但要注意，先焊下翼板上的两条角焊缝时，尽管上翼板已定位焊，仍要用 T 形梁的 e 值代入。翻转后再焊接上翼板的两条角焊缝时，才将工字梁的 e 值代入。

上述方法，也可用于箱形梁等其他截面梁夹紧力的计算，其中，e 值的代入，与工字梁的相同。

在 T 形梁和工字梁的焊接中，角焊缝的横向收缩将使翼板发生角变形（图 7.4-5），为防止此种变形，每单位长度所



允许施加的最大夹紧力可按式（7.4-11）求出。

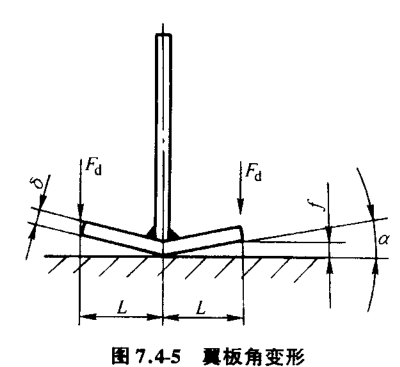


图 7.4-5 翼板角变形

若以翼缘与夹具工作台面紧贴为限定条件，即要求 $\Delta = h - h_L = 0$，则可按式（7.4-13）计算夹紧力。但应使 $F_d < F_{ds}$。

例如图 7.4-5 T 形梁，翼板 $L = 150$ mm，厚度 $\delta = 10$ mm，板材屈服点 $\delta_s = 235$ MPa，弹性模量 $E = 206\,000$ MPa，测得翼板自由状态下的焊接角变形 $\tan\alpha = 0.01$，求为防止此变形所需的夹紧力。

根据式（7.4-13），翼缘每单位长度应施加的夹紧力

$$F_d = \frac{206 \times 10^3 \times 10^3 \times 0.01}{4 \times 150^2}\ \text{N/mm} = 22.9\ \text{N/mm}$$

而根据式（7.4-11）算出的

$$F_{ds} = \frac{235 \times 10^2}{6 \times 150}\ \text{N/mm} = 26.1\ \text{N/mm}$$

因 $F_d < F_{ds}$，所以 F_d 值可用。通常为了使夹紧力留有裕度，实际采用值往往大于 F_d 值，但不能大于 F_{ds} 值。

2.6 焊件的定位、定位器及夹具体

2.6.1 焊件在焊接工装夹具中的定位方法

在装焊作业中，焊件按图样要求，在夹具中得到确定位置的过程称定位。

焊件在夹具中要得到确定的位置，必须遵循物体定位的“六点定则”。但对焊接结构件来说，被装焊的零件多是些切割和冲裁成形的板材和型材，未装焊前，多数刚度小、易变形，所以除在夹具上进行装配外，视焊件的大小常以现场和车间里的工作平台以及焊件变位设备的工作台面作为安装基面进行装焊作业，此时工作平台和台面不仅具有夹具体的作用，而且具有定位器的作用。另外，对焊接结构件的每个零件，不必都设六个定位支撑点来确定其位置，因为各零件之间都有确定的位置关系，可利用先装好的零件作为后装配零件某一基面上的定位支撑点，这样，可以简化夹具结构，减少定位器的数量。

为了保证装配精度，应将焊件几何形状比较规则的边和面与定位器的定位面接触，并得到完全的覆盖。

在夹具体上布置定位器时，应注意不妨碍焊接和装卸作业的进行，同时要考虑焊接变形的影响。如果定位器对焊接变形有限制作用，则多做成拆卸式或退让式的。对于这种操作式的定位器，应布置在便于操作的位置上。

2.6.2 定位器

定位器是保证焊件在夹具中获得正确装配位置的零件或部件，又称定位元件和定位机构。

定位器的结构主要有挡铁、支撑钉、定位销、V 形铁、定位样板五类。挡铁（图 7.4-6a）和支撑钉（图 7.4-6b）用于平面的定位，定位销（图 7.4-6c）用于焊件依孔的定位，V 形铁（图 7.4-6d）用于圆柱体、圆锥体焊件的定位，定位样板（图 7.4-6e）用于焊件与已定位焊件之间的给定定位。定位器可做成拆卸式的（图 7.4-6f）、进退式的（图 7.4-6g）和翻转式的（图 7.4-6h）。

对定位器的技术要求有耐磨度、刚度、制造精度和安装精度。在安装基面上的定位器主要承受焊件的重力，其与焊件的接触部位易磨损，要有足够的硬度。在导向基面和定程基面上的定位器，常承受焊件因焊接而产生的变形力，要有足够的强度和刚度。

如果夹具承重很大，焊件装卸又很频繁，也可考虑将定位器与焊件接触而易磨损的部位做成可拆卸或可调节的，以便适时更换或调整，保证定位精度。

2.6.3 夹具体

夹具体是在夹具上安装定位器和夹紧机构以及承受焊件质量的部分。

各种焊件变位设备上的工作台以及装焊车间里的各种固定式平台，就是通用的夹具体，在其台面上开有安装槽、孔，用来安放和固定各种定位器和夹紧机构。

在批量生产中使用的专用夹具，其夹具体是根据焊件形状、尺寸、定位及夹紧要求、装配施焊工艺等专门设计的。如图 7.4-7 所示，是一种年产 10 000 台件的装焊拖拉机扇形板的工装夹具，其夹具体就是根据焊件（图中双点划线所示）形状尺寸、定位夹紧要求由型钢和厚钢板拼焊而成的结构。夹具体上安装着定位器总成以保证零件 2 相对零件 1 的垂直度和相对高度。零件定位后，用圆偏心－杠杆夹紧机构夹紧，以保证施焊时零件相互位置不发生改变。

对夹具体的要求是：有足够的强度和刚度；便于装配和焊接作业的实施；能将装焊好的焊件方便地卸下；满足必要的导电、导热、通水、通气及通风条件；容易清理焊渣、锈皮等脏物；有利于定位器、夹紧机构位置的调节与补偿；必要时，还应具有反变形的功能。

通常，作为通用夹具体的装焊平台多为铸造结构，而专用夹具体多为板焊结构。

2.7 焊接工装夹具的精度与焊接结构制造精度等的关系

焊接工装夹具的精度与焊接结构的制造工艺要求以及结构本身的制造精度有关。焊件由于结构形式和使用工况的不同，对制造精度的要求差别很大。如金属构件（梁、柱、桁架等）和容器类的焊接结构，由于结构形式比较单一，制造质量主要决定于焊缝质量，对形状精度、位置精度，尺寸精度的要求不是很严。而且，这类结构多是单件生产，零件间的装配关系也比较简单，许多零件在装焊时，只是通过打磨、切割、配钻、铰孔、局部矫形和校正，依照零件间的相互位置关系“对号入座”进行装配、定位焊，最后进行焊接。所用的夹紧机构多是出力较大的机构，像螺旋夹紧机构、气动和液压夹紧机构等，以保证被组对的零件在焊接时不发生位置变化和形状变化。由于零件的定位多是根据零件之间给定的位置关系，依靠零件本身的端面、棱边、坡口来相互定位，若使用定位器定位，也多以挡铁、样板、工作平台（主要起夹具体的作用，兼作定位器）为主，因此，这类焊接结构的制造精度，在很大程度上取决于各组对零件下料时的尺寸精度和形状精度。我国已颁布了焊缝坡口形式和尺寸的国家标准（GB/T 985—1988、GB/T 986—1988），同时还颁布了热切割的质量和尺寸偏差的行业标准（ZBJ/T 59002.3—1988、ZBJ/T 59002.4—1988），零件下料时执行上述标准，是保证该类焊件结构尺寸和形状精度的关键。另外，定位器的制造安装精度要与零件的下料精度相匹配，否则，下料精度很低，定位器的精度再高也是没有意义的。

夹具体的刚度对上述焊接结构的形位精度也会带来较大影响。因为焊接时，结构的变形在所难免，如果夹具体的刚



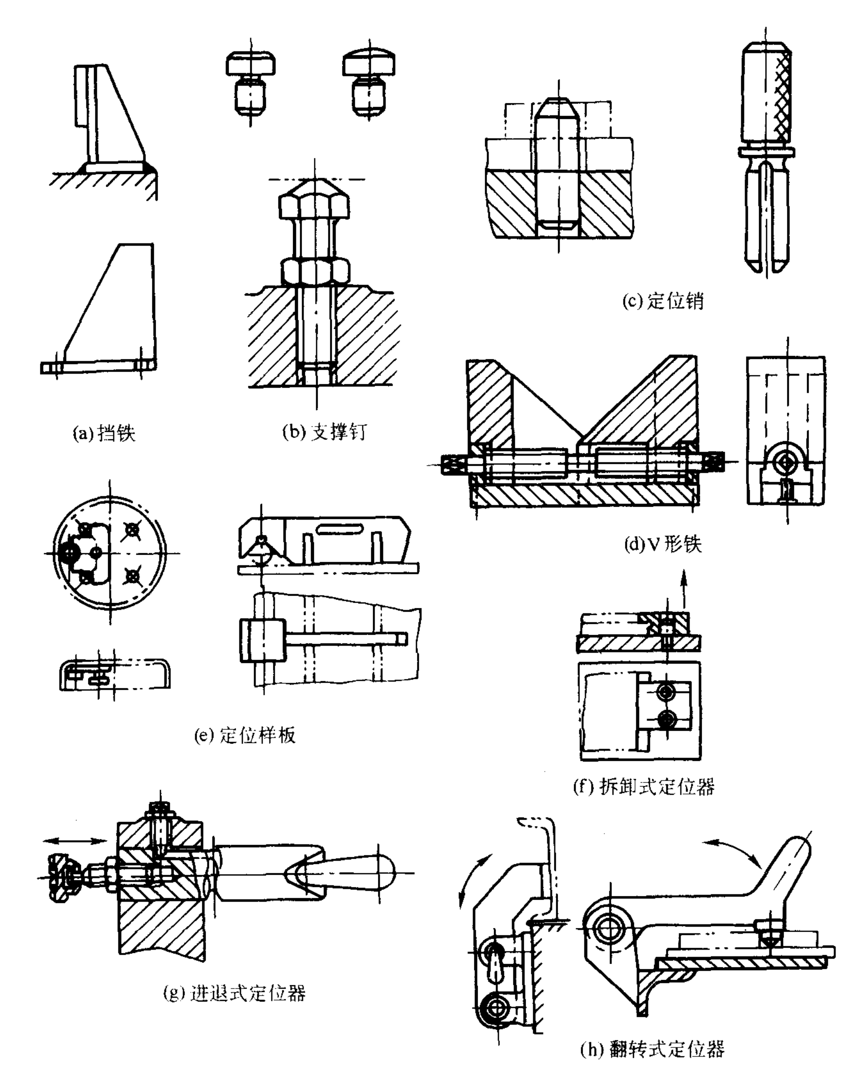


图 7.4-6 定位器

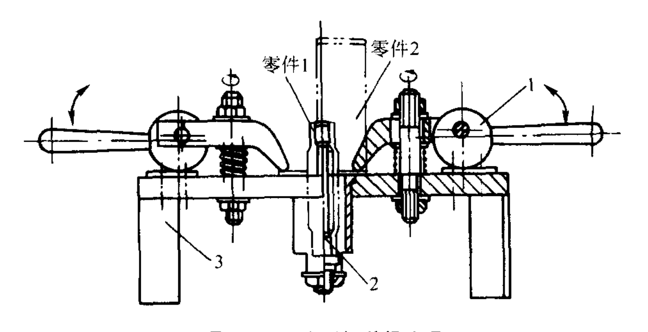


图 7.4-7 扇形板装焊夹具

1—圆偏心－杠杆夹紧机构；2—定位器总成；3—夹具体

度足够，夹紧力足够，则结构的焊接变形可限定在弹性恢复的范围内，否则，将会带来较大的残余变形。但是，对夹具体的结构刚度进行计算是很困难的，特别是结构比较复杂的夹具体，简化计算得出的刚度值往往和实际相差很大，所以工程上常用类比法、经验法、验算法来设计夹具体。对于作为夹具体的装焊平台，建议采用铸钢或铸铁结构，因为这种铸造结构受力后直至破坏前，变形甚小，而且比较经济。

对于焊接机器零件（焊接齿轮、焊接轴类等传动机器零件；焊接箱体、焊接床身、焊接机座等机器承重结构）的制造精度，要比前述焊接构件的制造精度高。但是，这种结构的焊后尺寸，不都是最终的使用尺寸，其上的配合面、配合孔、配合槽等安装其他零部件的部位，要通过机械加工得到最终尺寸。所以这种结构装焊时，一方面要控制整体变形，一方面要给各加工部位留有加工裕量。焊接工装夹具在此所起的作用，一是将整体变形尽量限制在弹性恢复的范围内。若夹具夹紧可靠，夹具体刚度足够，则弹性恢复所形成的残余变形相对很小，可限定在工程允许的范围以内；二是控制加工裕量不要留得太多，以免造成材料、加工工时、能源等的浪费。加工裕量的大小，与结构形状、焊缝布置、坡口形式、焊缝长度、焊接热输入、焊接方法、焊接次序、是否采用反变形等影响焊接变形的各因素有关。另外，也与是否使用工装夹具以及它的制造安装精度有关。在此诸多因素中，就焊接工装夹具的精度要求而言，由于夹具的使用对象是焊接机器零件，焊前各坯件结合处，一般都进行过机械加工，不仅尺寸规范，偏差较小，而且加工处的表面粗糙度也比热切割的要小。因此，夹具在保证夹紧力和夹具体刚度的前提下，控制好定位器的制造精度和安装精度就特别重要。这也是此类结构要求的夹具精度高于金属构件夹具精度的原因。

焊接机器零件的夹具虽然精度较高，但是除了精密器件用的焊接工装夹具外，在精度上仍低于冷加工用的夹具。这是因为在此类夹具上焊成的结构，还要进行机械加工，相对于机加工成品，只不过是一个焊接毛坯，也就是说，此类夹具的精度仅与焊接毛坯的精度有关。因此要切记不能以焊件的净尺寸（设计尺寸）来设计焊接工装夹具，夹具的制造精

度和安装精度要根据焊接毛坯的精度来定，一般要高出焊接毛坯精度一个等级。

最后，焊接工装夹具的精度还和焊接机械化、自动化程度有关。总的来讲，用于手工焊接作业的夹具精度，低于机械化焊接作业的夹具精度，而后者又低于自动化焊接作业的夹具精度。例如，以埋弧焊为例，其焊件的尺寸精度、装配精度以及所使用夹具的精度，均低于焊接机器人特别是弧焊机器人所要求的精度。再如，在汽车制造业中，为了大规模提高汽车生产的效率和整车质量的稳定性，在车体制造中广泛采用了焊接机器人，并要求汽车车体的综合误差控制在±2 mm以内（日本为±1 mm）。汽车车体多是用焊接机器人以点焊、气体保护焊、激光焊、螺栓焊等多种焊接方法拼焊成的薄板冲焊结构，焊前零件极易变形，又有一定的弹性。因此，在设计制造此类装焊夹具时，不仅要求夹具本身的制造、装配精度要高，而且还要考虑到焊前、焊后零件变形的影响。只有这样，才能适应自动化机器人焊接的需要和车体形状尺寸精度的要求。为此，美国密西根大学开发了一套计算机软件，以确定定位器和夹紧机构的最优数量和布置。该软件采用有限元方法，分析零件在装配过程中可能的变形，用非线性优化求出定位器的最佳配置。

2.8 夹紧机构

在装焊作业中，使焊件一直保持确定位置的过程叫做夹紧。使焊件保持确定位置的各种机构称为夹紧机构。夹紧机构对焊件起夹紧作用，是夹具组成中最重要最核心的部分，按动力源分，有手动的、气动的、液压的、磁力的、真空的、电动的、混合的共七类，而以手动和气动的应用最多。

2.8.1 手动夹紧机构

（1）手动夹紧机构的分类及特点

手动夹紧机构是以人力为动力源，通过手柄或脚踏板，靠人工操作用于装焊作业的机构。它结构简单，具有自锁和扩力性能，但工作效率较低，劳动强度较大，一般在单件和小批量生产中应用较多。

手动夹紧机构主要有如下几类：

手动夹紧机构

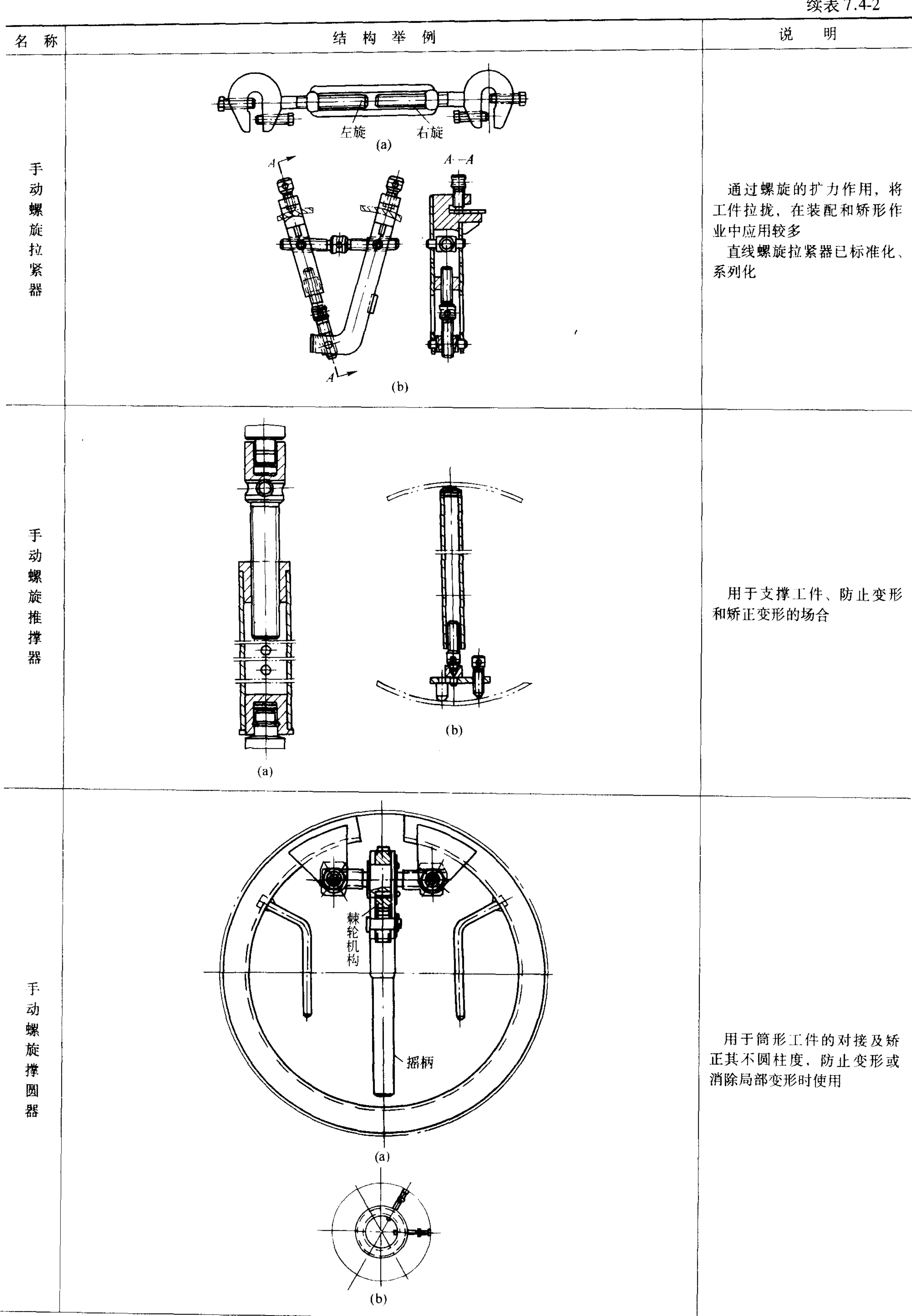
- 手动螺旋夹紧器
- 手动螺旋拉紧器
- 手动螺旋推撑器
- 手动螺旋撑圆器
- 手动楔夹紧器
- 手动凸轮（偏心）夹紧器
- 手动弹簧夹紧器
- 手动螺旋—杠杆夹紧器
- 手动凸轮（偏心）—杠杆夹紧器
- 手动杠杆—铰链夹紧器
- 手动弹簧—杠杆夹紧器
- 手动杠杆—杠杆夹紧器

其典型结构、性能、使用场合见表7.4-2。

表 7.4-2 手动夹紧机构的典型结构、性能及使用场合

名称	结构举例	说明
手动螺旋夹紧器	(a) (b) (c) 压脚 A A A—A (d) 筒形螺母 (e) 工件 (f)	结构简单，形式多样，适应面广，夹紧力较大，自锁性能好，但螺旋每转行程较小，动作缓慢，效率较低，多用于单件和小批量生产。图a夹钳式的手动螺旋夹紧器，国内已有商品供应，品种、规格较多

续表 7.4-2



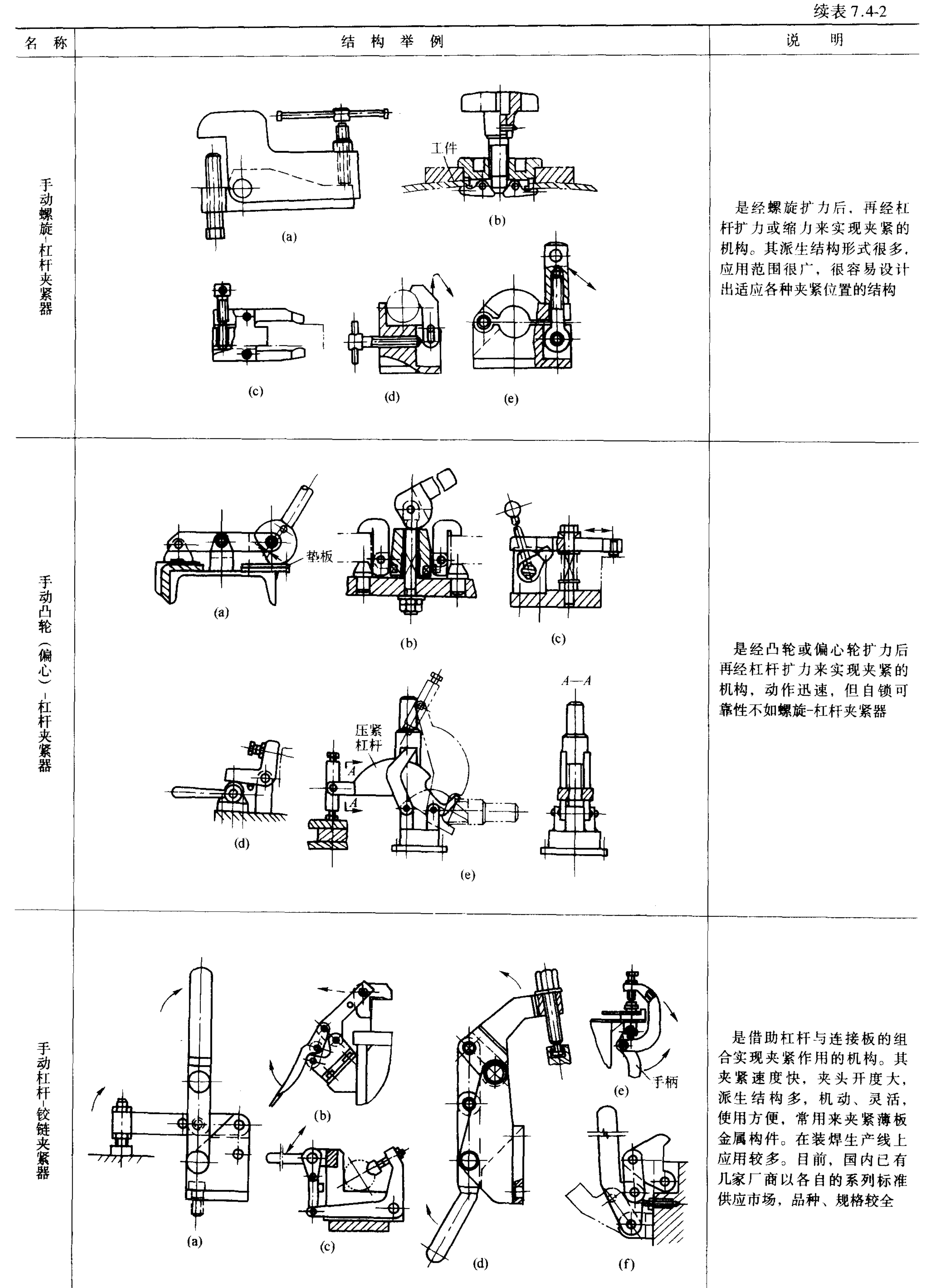
名　称	结 构 举 例	说　　明
手动螺旋拉紧器	(a) (b)	通过螺旋的扩力作用，将工件拉拢，在装配和矫形作业中应用较多 直线螺旋拉紧器已标准化、系列化
手动螺旋推撑器	(a) (b)	用于支撑工件、防止变形和矫正变形的场合
手动螺旋撑圆器	(a) (b)	用于筒形工件的对接及矫正其不圆柱度，防止变形或消除局部变形时使用



续表 7.4-2

名　称	结　构　举　例	说　明
手动楔夹紧器	(a) (b)	简单易操作，主要用于现场的装焊作业，为使楔在夹紧状态下既自锁可靠又便于退出，楔角应在 8°～11°内选取
手动凸轮（偏心）夹紧器	(a) (b) (c) (d)	手柄动作一次，即可将工件夹紧，夹紧速度要比螺旋夹紧机构快许多倍，但夹紧行程有限，扩力比及通用性不如螺旋夹紧机构大，自锁性能也不如螺旋夹紧机构可靠，多用在夹紧力不大和振动较小的场合
手动弹簧夹紧器	(a) (b)	是将弹簧力转换成夹紧力传递到工件上的夹紧机构，主要用于薄件的夹紧，所用多为圆柱螺旋弹簧，若需沿周边夹持圆形工件时，多采用膜片式弹簧

续表 7.4-2



名 称	结 构 举 例	说 明
手动螺旋-杠杆夹紧器	(a) (b) (c) (d) (e)	是经螺旋扩力后，再经杠杆扩力或缩力来实现夹紧的机构。其派生结构形式很多，应用范围很广，很容易设计出适应各种夹紧位置的结构
手动凸轮（偏心）-杠杆夹紧器	(a) (b) (c) (d) (e)	是经凸轮或偏心轮扩力后再经杠杆扩力来实现夹紧的机构，动作迅速，但自锁可靠性不如螺旋-杠杆夹紧器
手动杠杆-铰链夹紧器	(a) (b) (c) (d) (e) (f)	是借助杠杆与连接板的组合实现夹紧作用的机构。其夹紧速度快，夹头开度大，派生结构多，机动、灵活，使用方便，常用来夹紧薄板金属构件。在装焊生产线上应用较多。目前，国内已有几家厂商以各自的系列标准供应市场，品种、规格较全

续表 7.4-2

名　称	结 构 举 例	说　　明
手动弹簧-杠杆夹紧器		系弹簧力经杠杆扩力或缩力后实现夹紧作用的机构，适用薄件的夹紧，应用不广泛
手动杠杆-杠杆夹紧器		通过两级杠杆传力实现夹紧，扩力比大，但实现自锁较困难，应用不广泛

设计手动夹紧机构时，其手柄操作高度以 0.8 ~ 1 m为宜，操作力应在 150 N 以下，短时功率控制在 120 W 以内，夹具处在夹紧状态时，应有可靠的自锁性能。

（2）螺旋夹紧机构

螺旋夹紧机构是以螺旋副扩力，直接或间接夹紧焊件的夹紧机构。由于它扩力比大（60 ~ 140）、自锁可靠、结构简单、制作容易、派生形式多、适应范围广，已成为手动焊接工装夹具中的主要夹紧机构，约占各类夹紧机构总和的40%，在单件和小批量焊接生产中得到了广泛的应用。

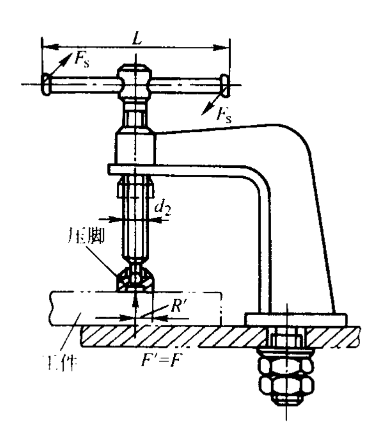


图 7.4-8　螺旋夹紧机构

螺旋副的夹紧力可按下式计算（图 7.4-8）

$$F=\frac{2F_sL}{d_2\tan(\lambda+\phi_1)+2R'\tan\phi_2} \qquad (7.4\text{-}22)$$

式中，F 为夹紧力，N；F_s 为加在手柄上的外力，N；L 为手柄上加力点的间距，mm；λ 为螺旋升角，且 $\tan\lambda=\frac{s}{\pi d_2}$，$s$ 为螺旋导程，mm；d_2 为螺旋中径，mm；ϕ_1 为螺杆与螺母间的当量摩擦角，梯形螺纹取 5°30′，普通螺纹取 6°35′；$\tan\phi_2$ 为焊件与压脚（或螺杆端部）间的摩擦因数，在 0.1 ~ 0.15 之间选取；R'为焊件与压脚（或螺杆端部）间的摩擦力矩半径，mm，根据图 7.4-9 所示的接触形式选取：点接触，$R'=0$；平面接触，$R'=\frac{d_1}{3}$；环面接触，$R'=\frac{1}{3}\times\frac{d_1^3-d^3}{d_1^2-d^2}$；圆周接触，$R'=R\cot\frac{\beta}{2}$。

利用式（7.4-22）算出的各种普通螺纹螺旋夹紧机构夹紧力，见表 7.4-3。

表 7.4-3　螺旋夹紧机构产生的夹紧力

序号	压脚接触类型	螺纹规格	手柄长度 L/mm	外力 F_s/N	夹紧力 F/N
1	点接触（见图 7.4-9a）	M10	120	25	4 200
		M12	140	35	5 700
		M16	190	65	10 600
		M20	240	100	16 500
		M24	310	130	23 000
2	圆周接触（见图 7.4-9b）	M10	120	25	3 000
		M12	140	35	4 000
		M16	190	65	7 200
		M20	240	100	11 400
		M24	310	130	16 000
3	环面接触（见图 7.4-9c）	M10	120	45	4 000
		M12	140	70	5 800
		M16	190	100	8 500
		M20	240	100	8 500
		M24	310	150	14 600

注：此表建立在 $L\approx14d_2$；$\phi_1=6°34'$，$\tan\phi_2=0.1$，$\beta=120°$等条件的基础上，并考虑了螺旋所能承受的强度。

焊接工装夹具中的螺旋副，都是传力滑动螺旋副。其失效形式主要是螺杆的失稳或拉断以及螺纹牙根处的剪断或弯断。以螺纹磨损而失效的情况并不多见。因此，进行设计时，应以强度计算为主，并对受压螺杆进行稳定性验算。所用公式，请参阅机械设计手册有关螺旋传动的章节。

螺旋副的牙型常选用梯形螺纹。虽然梯形螺纹的机械效率比矩形螺纹低一些，但牙根强度高、加工工艺性好，内外螺纹是锥面接触而对中性好，且不易松动，所以在夹紧机构的螺旋副中得到广泛的应用。

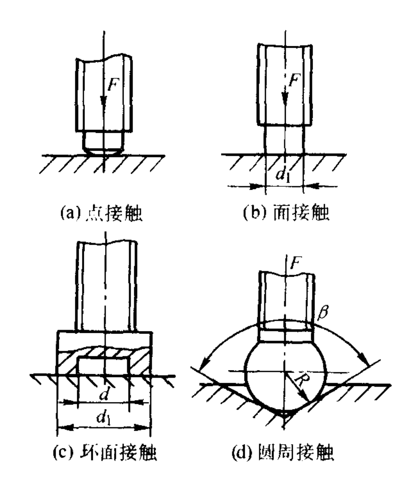


图 7.4-9 压脚接触形式

当螺旋副的公称直径小于 12 mm 时，常选用粗牙普通螺纹。普通螺纹的自锁性好，螺纹小径处螺牙厚度与螺距的比值比其他螺纹大得多，因而相对抗剪强度很高。另外，这种螺纹的牙底有较大的圆角，所以应力集中也小。当夹具安装和作业空间受到限制而需用小直径螺旋副时，采用这种牙型的螺纹，更加容易满足夹具使用的工况要求。

螺杆常用的材料有 Q275、45 和 50 钢，通常不经热处理而直接使用。螺母的材料有 QT400、35 和 ZCuSn10Pb1 等。

螺旋副的旋合长度选用中等旋合长度的下限值，这样有利于焊后夹具的松夹。螺旋副一般采用粗糙精度，要求较高时，才选用中等精度。

螺旋夹紧机构夹紧焊件的方式有两种：一种是螺杆端部直接与焊件接触进行夹紧，这种方式的缺点是夹紧过程中容易使焊件移动，同时还容易损伤焊件表面；另一种方式是螺杆端部通过活动压脚夹紧焊件，这种方式不仅克服了上述缺点，而且由于压脚是活动的，其夹紧方位在一定范围内可自行调节，所以能和焊件夹紧面很好地贴合在一起，因而提高了夹紧的可靠性。另外，夹紧力通过压脚传递到焊件夹紧面上，其分布面积较大，也较均匀。

活动压脚的结构形式见图 7.4-10。

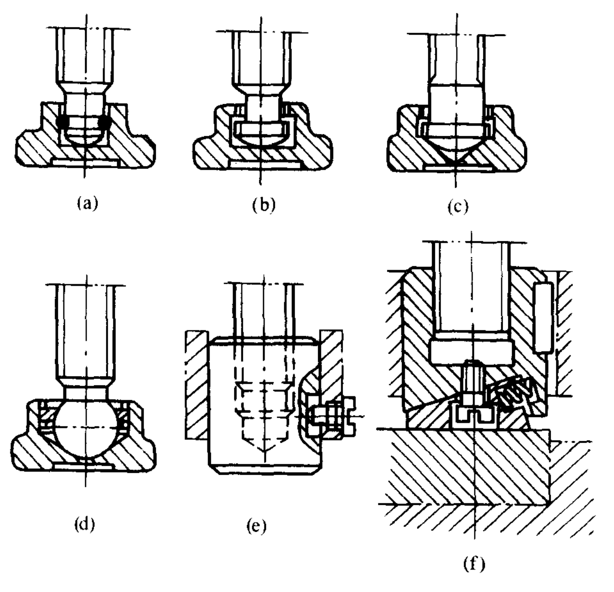


图 7.4-10 活动压脚的结构形式

(a)、(b)、(c)、(d) 摆动式压脚；(e)、(f) 定向式压脚

图 7.4-10a 表示的压脚由销钉或弹性卡环装在螺杆端部，而销钉或弹性卡环与螺杆槽之间有足够的间隙，可使压脚自由摆动。图 7.4-10b 表示的压脚结构类似特殊螺母，当压脚旋转到螺杆末端以后不会掉出，并能自由摆动。图 7.4-10c 表示的压脚与图 7.4-10b 相似，只是它的螺杆端部与压脚配合的颈部直径相同，且螺杆端部与压脚不是点接触而是圆周接触，因而降低了接触应力。图 7.4-10d 表示的压脚是用一特制螺母将螺杆与压脚相连。图 7.4-10e 表示的压脚用在给予焊件轴向压力的同时，还需利用压脚端面摩擦力使焊件不发生侧向移动的场合。图 7.4-10f 表示的压脚在夹紧过程中，能给予焊件向下和向右的两相互垂直的夹紧力。松夹时，弹簧可使楔块恢复到初始位置。图 7.4-10e、f 所示的压脚螺纹为左螺纹，同时还设有防止压脚回转的外套（双点划线所示）。

活动压脚，特别是摆动式活动压脚，不仅在螺旋夹紧机构中广泛采用，而且在其他夹紧机构的出力端也常被采用。

(3) 凸轮（偏心）夹紧机构

各类凸轮（偏心）夹紧机构的主要特点是开合速度快，夹紧敏捷。用圆偏心轮来实现夹紧，由于制作容易，已成为该类夹具中应用最广泛的夹紧形式，其夹紧力按下式计算（图 7.4-11）

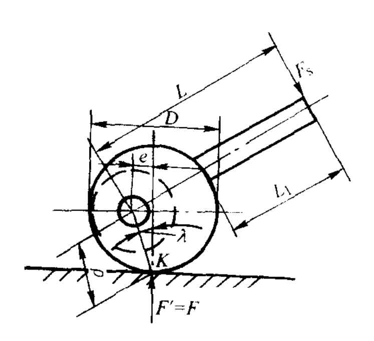


图 7.4-11 圆偏心夹紧器

$$F=\frac{F_s L}{\rho[\tan(\lambda+\phi_1)+\tan\phi_2]} \tag{7.4-23}$$

式中，F 为夹紧力，N；F_s 为作用在手柄上的外力，N；ϕ_1 为圆偏心轮与转轴之间的摩擦角，通常取 6°；ϕ_2 为圆偏心轮与焊件之间的摩擦角，通常取 6°；λ 为接触点的升高角 (°)，升高角随接触点而变化，若以 K 点（图 7.4-11）为准进行夹紧力计算时，则 $\lambda=\arctan\frac{2e}{D}$，其中 e 为偏心距，D 为圆偏心轮的直径；L 为外力作用点至圆偏心轮转动中心的距离，mm；ρ 为焊件与圆偏心轮的接触点至转动中心的距离，mm，ρ 也随接触点而变化，若以 K 点为准进行夹紧力计算时，$\rho=\frac{D}{2\cos\lambda}$。

若以 $L\approx(4\sim5)\frac{D}{2}$，$\phi_1=\phi_2=6°$，$\lambda=4°$（圆偏心夹紧机构满足自锁条件的平均升高角），$\rho=\frac{D}{2}$ 代入式 (7.4-23)，可算得 $F\approx12F_s$。由此不难看出，圆偏心夹紧机构的扩力比远远小于螺旋夹紧机构的扩力比。

由于圆偏心夹紧机构的扩力比小，且自锁性能随升高角的变化而变化，因而夹紧稳定性不够，所以多用在夹紧力不大、振动较小、开合频繁的场合。

圆偏心夹紧机构的理论夹紧行程应是偏心距 e 的 2 倍，但在实际应用时，多以圆偏心轮 K 点左右夹角 $\gamma=35°\sim45°$ 的一段圆弧面作为夹紧面，因此，根据图 7.4-12 所示，其夹紧行程 s 可按下式求出

$$s=2e\sin\gamma$$

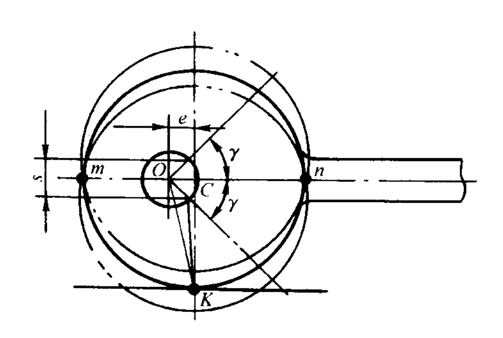


图 7.4-12　圆偏心夹紧机构的夹紧行程

由于焊接件的表面大多是非加工面，厚度公差较大，所以要求装焊用的圆偏心夹紧机构，其夹紧行程的包容量要大，以适应夹紧焊件的需要。

因圆偏心轮工作时是高副接触，容易磨损，为了减缓其磨损，设计时要求偏心轮表面进行渗碳淬火，其硬度应达到50～60HRC，大于垫板工作面的硬度。另外，考虑到磨损的补偿，应将圆偏心轮接触的垫板做成可更换或可调节的。

为了便于操作，也为了减缓圆偏心轮轮面的磨损，其表面粗糙度应不大于 $R_a1.6\ \mu m$。要注意，不能用增加表面粗糙度的方法来提高圆偏心夹紧机构的自锁性能。

另外，为了保证圆偏心夹紧机构具有自锁性能，设计时应使 $D \geq 14e$。

圆偏心夹紧机构的结构形式如图 7.4-13 所示，有凸轮式、手柄式，转轴式三类。凸轮式和转轴式的区别是，前者的圆偏心轮是套在转轴上的，通过键将转轴上的力矩传递到圆偏心轮上；后者的圆偏心轮与转轴被做成一体，因此，传力好，结构紧凑。考虑到圆偏心轮占用空间过多会不利于焊件的装卸和焊接作业，可将其无用部分削去（图 7.4-13b、c、d）。为了增加夹紧行程，也可将偏心轮作成双面工作的（图 7.4-13b、c）。转轴式圆偏心夹紧机构，有双支撑（图 7.4-13f）和单支撑（图 7.4-13g）的，双支撑的刚性好，用在夹紧力较大的场合。

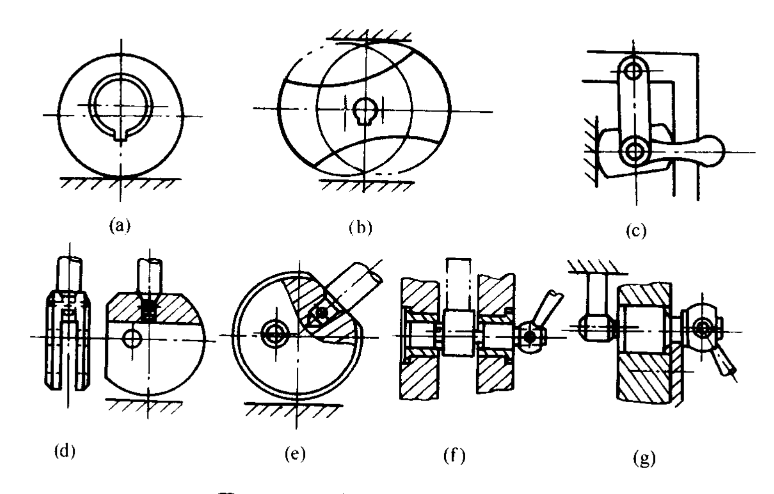


图 7.4-13　圆偏心夹紧机构的结构形式
(a)、(b)、(c) 凸轮式；(d)、(e) 手柄式；(f)、(g) 转轴式

(4) 杠杆－铰链夹紧机构

1) 杠杆－铰链夹紧机构的类型　杠杆－铰链夹紧机构是由杠杆、连接板及支座相互铰接而成的复合夹紧机构。根据三者不同的铰接组合，共有五种基本类型。

第一类结构形式如图 7.4-14 所示。两组杠杆（手柄杠杆和夹紧杠杆）通过与连接板的铰接组合在一起。手柄杠杆的施力点 B 与夹紧杠杆的受力点 A 通过连接板的铰链连接在一起，而两组杠杆的支点 O、O_1 都与支座铰接而位置是固定的。

第二类结构形式如图 7.4-15 所示。虽然也是两组杠杆与一组连接板的组合，但是手柄杠杆的施力点 B 是与夹紧杠杆的受力点 A 铰接在一起的，而手柄杠杆在支点 O 处是与连接板铰接的。因此，手柄杠杆的支点 O 可以绕 C 点回转，连接板的另一端（C 点）和夹紧杠杆的支点 O_1 均与支座铰接而位置是固定的。同理，也可设计成夹紧杠杆在支点处与连接板铰接，夹紧杠杆的支点转动，连接板的另一端和手柄杠杆的支点均与支座铰接而位置固定。这实际上是将图 7.4-15 中的手柄杠杆视做夹紧杠杆，夹紧杠杆视做手柄杠杆。其具体图例见图 7.4-25 上方的四个小图。

第三类结构形式如图 7.4-16 所示。它是一组杠杆与一组连接板的组合，手柄杠杆的支点 O 与支座铰接而位置固定。

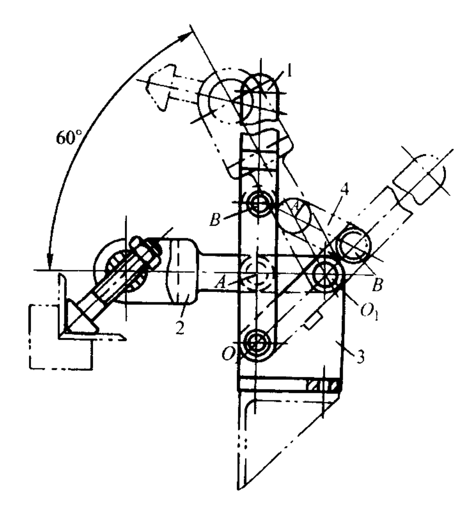


图 7.4-14　第一类杠杆－铰链夹紧机构
1—手柄杠杆；2—夹紧杠杆；3—支座；4—连接板；
A—夹紧杠杆的受力点；B—手柄杠杆的施力点；
O—手柄杠杆的支点；O_1—夹紧杠杆的支点



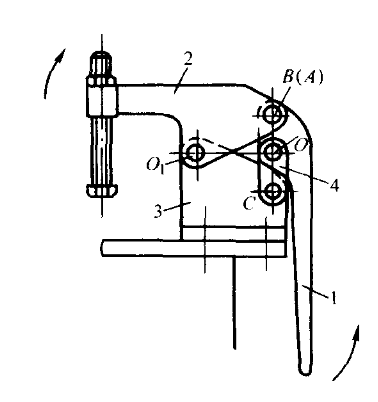


图 7.4-15　第二类杠杆 - 铰链夹紧机构

1—手柄杠杆；2—夹紧杠杆；3—支座；4—连接板；
A—夹紧杠杆的受力点；B—手柄杠杆的施力点；
O—手柄杠杆的支点；O_1—夹紧杠杆的支点

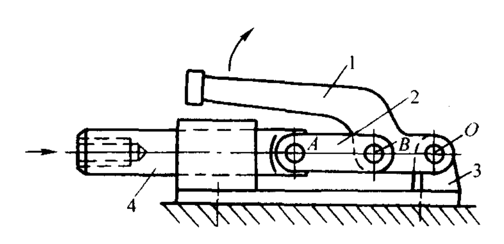


图 7.4-16　第三类杠杆 - 铰链夹紧机构

1—手柄杠杆；2—连接板；3—支座；4—伸缩夹头；
B—手柄杠杆的施力点　O—手柄杠杆的支点
A—伸缩夹头的受力点

第四类结构形式如图 7.4-17 所示。它也是一组杠杆与一组连接板的组合，但是手柄杠杆的支点与连接板铰接，因此，手柄杠杆的支点 O 可以绕连接板的支点 C 回转。

第五类结构形式如图 7.4-18 所示，它是一组杠杆与两组连接板的组合。

以上第二类、第四类相应地与第一类、第三类相比，由于手柄杠杆在支点处与连接板铰接在一起，所以将手柄杠杆

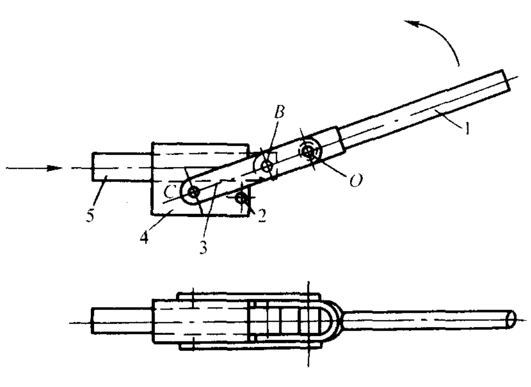


图 7.4-17　第四类杠杆 - 铰链夹紧机构

1—手柄杠杆；2—挡销；3—连接板；4—支座；5—伸缩夹头
O—手柄杠杆的支点　B—手柄杠杆的施力点、伸缩夹头的受力点

扳动一个很小的角度，夹紧杠杆或压头就会有很大的开度，但其自锁性能不如第一类、第三类可靠。

2）杠杆 - 铰链夹紧机构的夹紧力　现以图 7.4-14 所示的第一类杠杆 - 铰链夹紧机构为例，分析夹紧力的计算。首先，根据图 7.4-14 所示的结构图，画出手柄杠杆 1 在夹具处在未自锁状态（即位置角 $\psi < 90°$）时的受力简图（图 7.4-19a)。图中，手柄力 F_s 垂直作用在手柄杠杆的 C 点；夹紧反力 F' 作用在夹紧杠杆 2 上的 D 点，其力线方向与夹紧杠杆的夹角为 α（已知值）。然后，以夹紧杠杆 2 为受力体（图 7.4-19b）来建立 F' 与连接板对夹紧杠杆的作用力 F_{42} 之间的关系式。由于连接板是二力杆，若忽略其铰链内的摩擦，则力 F_{42} 的作用线应与连接板两孔中心的连线 AB 相重合。当夹具各铰链中心的间距 $OB = a$、$BA = b$、$AO_1 = c$、$O_1O = d$ 为定值时，手柄杠杆位置角 ψ 与夹紧杠杆的摆角 ϕ、连接板与夹紧杠杆的夹角 β、连接板与手柄杠杆的夹角 γ 之间，都有各自的对应关系，即存在 $\phi = f_1(\psi)$、$\beta = f_2(\psi)$、$\gamma = f_3(\psi)$ 函数关系式。用解析法来建立这些关系式是很麻烦的，所以在工程上往往用作图法来得到不同 ψ 值时分别对应的 ϕ、β、γ 值。也就是说，ψ_i 值确定后、ϕ_i、β_i、γ_i 等值也确定了。

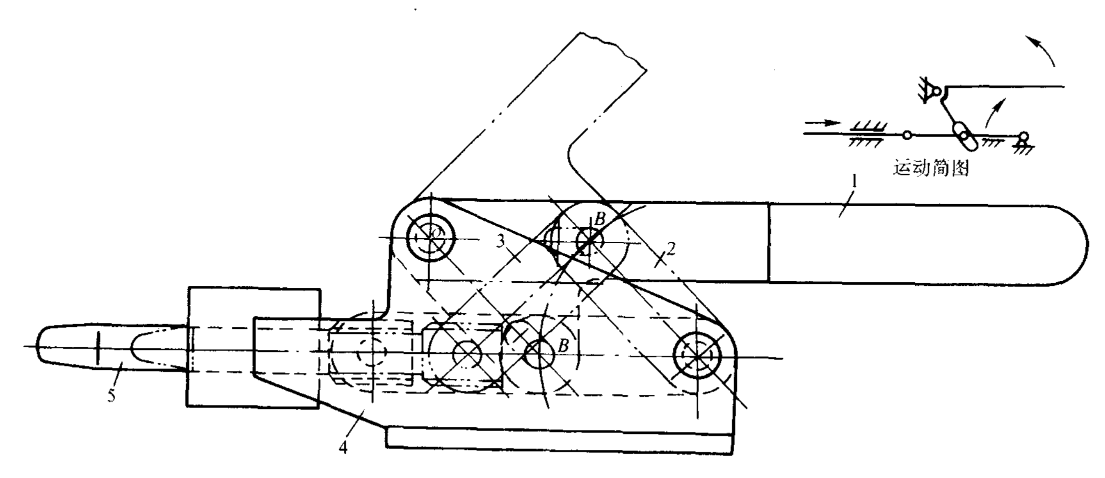


图 7.4-18　第五类杠杆 - 铰链夹紧机构

1—手柄杠杆；2—连接板（Ⅰ）；3—连接板（Ⅱ）；4—支座；
5—伸缩夹头；B—手柄杠杆的施力点；O—手柄杠杆的支点

由图 7.4-19b 夹紧杠杆受力图和图 7.4-19c 手柄杠杆受力图，并考虑到夹紧力 $F = F'$，可得出夹紧力的表达式

$$F = F_s \times \frac{c(L_0 + a)\sin\beta}{a(L + c)\sin\gamma\sin\alpha} \qquad (7.4\text{-}24)$$

前已述及，β、γ 角是手柄杠杆位置角 ψ 的变量，因此由式（7.4-24）可知，F 也是 ψ 角的变量。当 $\psi < 90°$ 即 $\gamma \neq 0°$ 时，F 和 F_s 有确定的关系，但此时的机构不自锁，一旦手柄力撤去，$F = 0$，就失去了夹紧作用。因此，对手动夹具而言，此时没有使用意义。当 $\psi = 90°$，$\beta \approx 90°$，$\gamma = 0°$

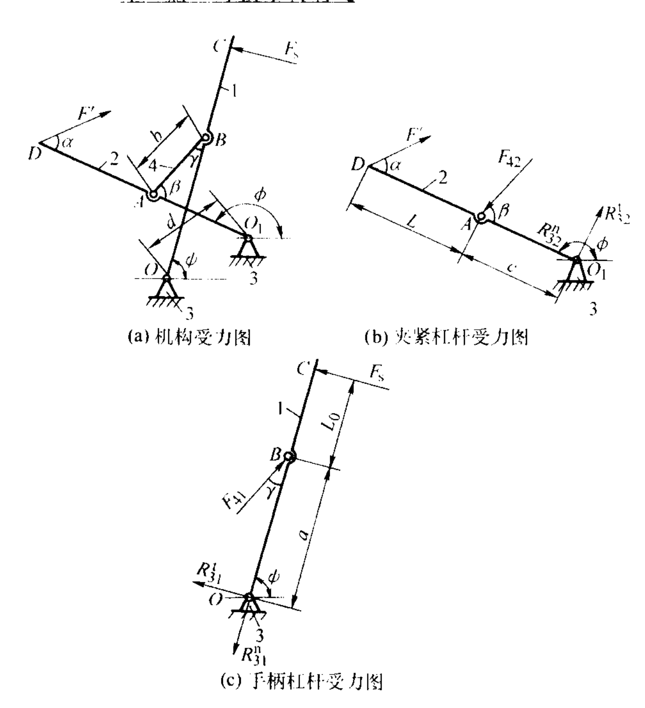


图 7.4-19 杠杆－铰链夹紧机构的受力简图

1—手柄杠杆；2—夹紧杠杆；3—支座；4—连接板；
A—夹紧杠杆的受力点；*B*—手柄杠杆的施力点；
O—手柄杠杆的支点；O_1—夹紧杠杆的支点

(即 *B*、*A*、*O* 三点共线时)，夹紧力 $F=\infty$。此时的夹紧机构处于自锁状态，即使将手柄力撤去，仍有夹紧作用。而且夹紧力 *F* 的大小和装焊时焊件的反力有关，它们大小相等，方向相反，但受结构强度的制约，也不可能达到无限大。由此可知，手动杠杆－铰链式夹紧机构只有在自锁状态下，才有使用价值。此时，夹紧力的大小与手柄力的大小无关，其最大值仅受夹具结构强度的限制。手柄力所起的作用，并不是为了得到夹紧力，从理论上讲，它只是用来克服铰链中的摩擦阻力及手柄杠杆和夹紧杠杆自重所引起的阻力，使杠杆－铰链夹紧机构能到达自锁位置而已。

另外，手动杠杆－铰链夹紧机构的自锁性能与螺旋、圆偏心夹紧机构的自锁性能还有所不同。螺旋夹紧机构在夹紧过程中都有自锁作用；圆偏心夹紧机构在偏心圆的半圆接触面上也有自锁作用，只不过自锁性能是变化的，不够稳定而已。用式 (7.4-22)、式 (7.4-23) 计算出的夹紧力，都是自锁状态下的夹紧力，因此，对该类手动夹具而言，有实用意义。但是对杠杆－铰链夹紧机构，用式 (7.4-24) 算出的是在非自锁状态下的夹紧力，所以对这类夹具而言，并无实用意义。

由于非自锁状态下计算出的夹紧力，对手动式夹具没有实用意义，所以在进行此类夹具结构设计时，是从焊件的夹紧反力出发，并考虑到自锁条件，然后进行强度计算来确定有关杆件的截面尺寸和铰链的轴销尺寸。如图 7.4-19 所示的机构，夹紧状态时 $\beta=90°$，可根据夹紧反力并利用图 7.4-19b 建立的力矩平衡方程式和力平衡方程式算出 F_{42} 和铰链 O_1 的反力 R_{32}，然后再根据强度计算，即可算出夹紧杠杆的截面尺寸及其铰链的轴径。

以上虽然是以第一类杠杆－铰链夹紧机构为例，来讨论夹紧力计算及有关问题的，但其结论对其他四种类型的杠杆－铰链夹紧机构也是适用的，因此不再赘述。

3) 杠杆－铰链夹紧机构的设计　设计杠杆－铰链夹紧机构时，一般应把握以下要点。

① 通常先按照焊件的夹紧要求，初选一种夹紧结构形式，继而根据夹紧位置、夹紧行程、松夹开度以及焊件装卸要求等，用几何作图法确定各杆件的相关位置、以及各杆件铰链的间距。然后，以相关铰链点的连接线为中心线，确定各杆件的平面尺寸和形状。此时要注意各杆件的平面尺寸和形状，以及它们之间的连接是否满足夹紧位置、夹紧行程以及松夹开度的要求；在机构运动过程中，杆件与杆件或杆件与焊件是否存在不应有的接触及干涉现象。如有上述问题，则仍用作图法修改有关铰链点的间距、及杆件的平面尺寸和形状。通常，这样的修改工作要反复进行多次，才能将各个杆件的平面尺寸和形状确定下来。完成上述工作后，再以此平面图为基础，画出装配图，确定整个夹紧机构和各个零件的结构图形尺寸，并对夹紧杠杆、手柄杠杆、销、轴等进行强度计算和验算，必要时还要对杠杆进行刚度验算，同时还需画出夹紧机构在极限位置的运动轨迹图，以再次检查是否有不应有的接触及运动干涉现象。如无问题，最后才画出零件图。另外，杠杆－铰链夹紧机构的压头应设计成可调节的，以适应不同夹紧方向、不同厚度的焊件和补偿被夹焊件的厚度偏差。如图 7.4-14 所示，其压头压紧角度和高度就是可调节的。有的压头还设计成能沿夹紧杠杆移动的，以适应夹紧点的调节。

② 对于手动杠杆－铰链夹紧机构，在确定其结构形式时，应使机构在夹紧状态下，手柄杠杆能因自重作用而保持有进一步夹紧焊件的趋势。这样可避免因振动等原因，而使夹具在工作过程中出现不应有的松夹现象。如图 7.4-15 ~ 图 7.4-17 所示的夹紧机构，其手柄杠杆在自重作用下就能对焊件夹得更紧，而图 7.4-20 所示的夹紧机构，其手柄杠杆在自重作用下，有可能导致夹具松夹。因此设计该类夹紧机构时，应注意使手柄杠杆在自重作用下所形成的力矩转向与手柄杠杆夹紧焊件时的转向一致。如图 7.4-21 所示，当手柄杠杆的重心在其支点 *O* 以右时，则形成的转矩与手柄杠杆夹紧时的转向一致，因而有进一步夹紧焊件的趋势。

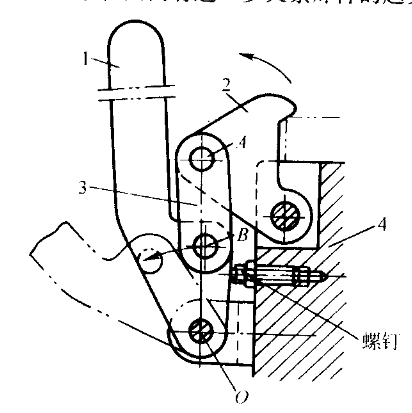


图 7.4-20 第一类杠杆－铰链夹紧机构

1—手柄杠杆；2—夹紧杠杆；3—连接板；4—支座；
A—夹紧杠杆的受力点；*B*—手柄杠杆的施力点；
O—手柄杠杆的支点

③ 设计的手动杠杆－铰链夹紧机构必须在夹紧位置具有自锁性能。为此，先从机构学的角度，对杠杆－铰链夹紧机构作一分析。在前文中，已将此类夹紧机构归纳成五种类型，其中除第五类外，有的属于铰链四杆机构的基本型（曲柄摇杆、双曲柄、双摇杆机构）；有的属于基本型的演化型。如图 7.4-14 和图 7.4-15 所示的第一、二类夹紧机构就属于基本型，而图 7.4-16 所示的第三类夹紧机构和图 7.4-17 所示的第四类夹紧机构就分别属于由基本型演化成的曲柄滑块机构和直动滑杆机构。根据机构学的运动分析得知，杠杆－铰链夹紧机构出现自锁的位置就是铰链四杆机构出现“死点”的位置，而要出现“死点”，必须使从动杆与连杆共线。



在夹紧机构中，因自锁时的夹紧反力通过夹紧杠杆的主动作用，迫使手柄杠杆有反向运动的趋势，所以手柄杠杆相当于从动杆，而连接板相当于连杆。因此，进行夹紧机构设计时，一定要使手柄杠杆两铰链孔中心的连线与连接板两铰链孔中心的连线在夹紧位置时共线。也就是说，对第一类、第三类夹紧机构，手柄杠杆的支点 O 必须在连接板两铰链孔中心的连线 AB 上（图 7.4-14、图 7.4-16、图 7.4-21、图 7.4-22），使 O、A、B 三点共线；对第二类、第四类夹紧机构，手柄杠杆的施力点 B 必须在连接板两铰链孔中心的连线 OC 上（图 7.4-15、图 7.4-17、图 7.4-23），使 B、O、C 三点共线。上述要求，也是确定夹紧机构四个铰链点的相关位置时，必须满足的条件。

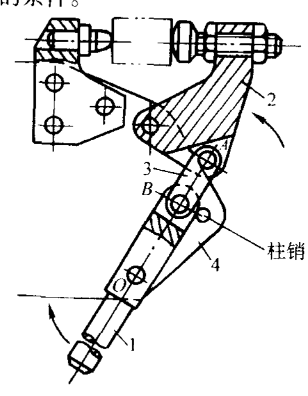


图 7.4-21 第一类杠杆 - 铰链夹紧机构

1—手柄杠杆；2—夹紧杠杆；3—连接板；4—支座；A—夹紧杠杆的受力点；B—手柄杠杆的施力点；O—手柄杠杆的支点

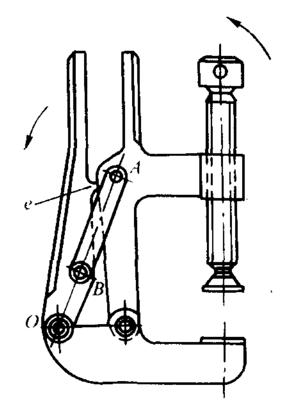


图 7.4-22 第一类杠杆 - 铰链夹紧机构

以上，从理论上分析了夹紧机构形成自锁的条件。但在实际设计时，对第一类、第三类夹紧机构，往往使 B 点偏离 OA 连线一微小距离；对第二类、第四类夹紧机构，O 点偏离 BC 连线一微小距离，而并不设计成三点共线。偏离点的偏离方向可这样来决定，就是手柄杠杆松夹时，偏离点必须通过 OA 或 BC 连线。例如图 7.4-20 所示偏离点 B 应在 OA 连线的右方；图 7.4-23 所示的偏离点 O 应在 BC 连线的下方。B、O 点的偏离量一般为 0.5 ~ 3 mm，若夹具结构尺寸和铰链配合间隙较大，应取上限值。

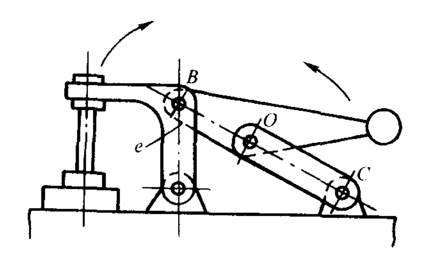


图 7.4-23 第二类杠杆 - 铰链夹紧机构

这样做的目的，是为了夹具能更加可靠地工作，因为夹具在夹紧状态遇到振动等外界因素的影响时，也有可能导致松夹，此时，B、O 两点通过各自连线的瞬间，必然会形成三点共线而自锁，从而使夹具不易出现自行松夹的危险。

设计时，为了保证 B 点或 O 点的偏离量不至于过大，常设置螺钉（图 7.4-20）、柱销（图 7.4-21）或夹具元件之间的局部接触（图 7.4-22 和图 7.4-23 的 e 处）来限位，以防止反向松夹。

④ 设计夹紧机构的具体结构时，各构件的铰接多采用铆接连接。各铰链孔和销轴的直径以及它们的精度与配合都设计成一样的。在手柄杠杆的操作部位，应热压一层隔热隔电材料。设计的夹紧杠杆应保证压脚在其上能够进行上下、左右的调整。当夹紧机构的生产批量很大时，应将各构件，包括支座在内都设计成冲压结构。

国外生产手动杠杆 - 铰链夹紧机构的厂家多已有系列品种供应，形式多样、规格齐全。我国也有几个厂家成系列地生产此类夹紧机构，国内还有一些经销商代销国外的此类产品，个别外企还在我国建立了生产基地，就近制造，就近销售。

佳木斯联合收割机厂曾从德国 DE - BTA - CO 公司引进了三种 12 个规格的杠杆 - 铰链夹紧器，其结构如图 7.4-24a、b、c、d 所示，技术数据见表 7.4-4 和表 7.4-5。国内代销的德国 VEKTEK 公司生产的较典型的此类产品的结构和数据如图 7.4-24e、f、g、h、i 所示。

表 7.4-4 手动杠杆 - 铰链夹紧器

型号	代号	夹紧力/N	结构尺寸/mm									自重/kg	备注
			K	H	L	B	W	G	E	F	D		
U 型	270	5 000	M12 × 90	74	253	190	66	51	27	50	4 - ϕ9	1.3	见图 7.4-24a
	210	2 800	M10 × 70	52	206	140	64	48	32	45	4 - ϕ8.5	0.6	
	207	1 700	—	41	175	90	45	35	19	32	4 - ϕ6.5	0.3	
I 型	270	5 000	M12 × 90	95	274	190	33	—	27	—	4 - ϕ9	1.3	见图 7.4-24b
	210	2 800	M10 × 70	75	229	140	24	—	32	—	4—ϕ8.5	0.6	
	207	1 700	—	56	188	—	18	—	19	—	4 - ϕ6.5	0.3	
SJ 型	01	3 200	见图 7.4-24c									1.1	

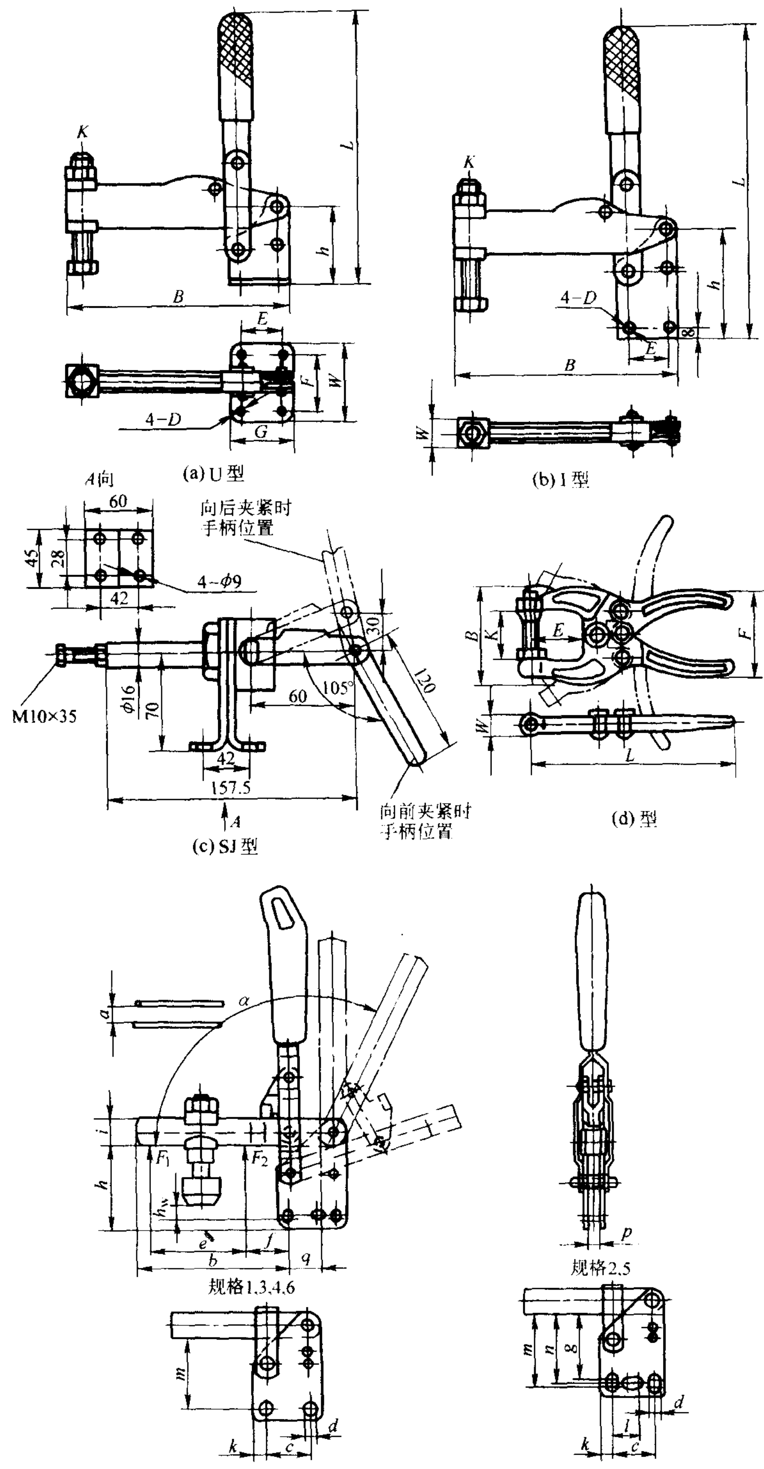
表 7.4-5 夹钳式杠杆 - 铰链夹紧器

型号	夹紧力/N	结构尺寸/mm						自重/kg	备注
		K	B	W	L	E	F		
486	5 400	152	230	16	230	65	—	1.2	见图 7.4-24d
484	5 200	92	138	15	205	—	50	0.95	
462	4 500	76	—	—	213	67	51	0.8	
425	3 000	30	80	15	160	45	50	0.4	
424	900	26	54	13	114	28	41	0.2	

读者在进行夹具设计时，如市场上有符合需要的夹紧器供应，则应以外购为首选。

手动杠杆 - 铰链夹紧机构的结构形式很多，每一基本类型都可派生出许多不同的结构形式。例如，属于第一类、第二类的手动杠杆 - 铰链夹紧机构就派生出了 32 个品种（图 7.4-25）。如用户购置不到合适的杠杆 - 铰链夹紧机构，可从基本类型出发，根据夹紧要求，变换设计成所需的结构形式。

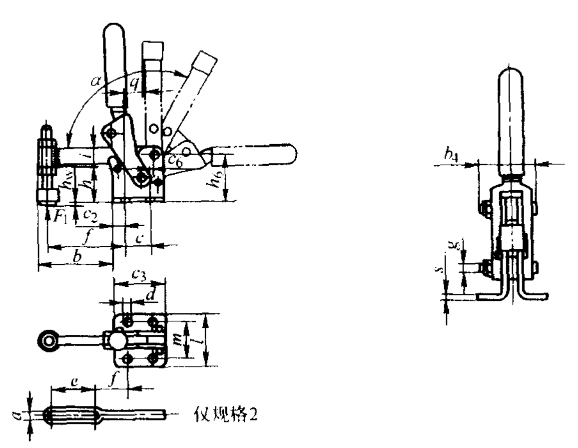




规格	F_1 /kN	F_2 /kN			h_w		[G]	尺寸 /mm																
								a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	p	q	α	α^*
1	0.8	1.1	115	60	2~9	M5×30	105	5	38	16	4.5	19	14	—	31	10	5.5	—	26.5	—	5.0	12	95°	—
2	1.0	1.2	157	82	5~14	M6×35	175	6	51	20	5.5	25	20	30	38	12	5.0	12.5	33.0	31.5	5.5	13	105°	60°
3	1.4	2.5	220	112	8~20	M8×45	410	8	80	20	7.1	43	27	—	48	18	7.5	—	42.0	—	6.0	16	105°	60°
4	2.0	3.0	252	140	5~33	M8×65	630	10	100	32	8.5	61	30	—	65	20	13.0	—	55.5	—	8.0	22	105°	60°
5	3.0	5.0	321	195	8~45	M12×80	1 480	14	142	45	8.5	88	40	61.5	76	25	9.5	31.5	66.5	64.0	10.0	31	115°	60°
6	3.5	5.5	372	230	20~76	M12×110	2 200	14	165	50	10.5	90	55	—	116	30	12.5	—	104.0	—	10.0	35	105°	60°

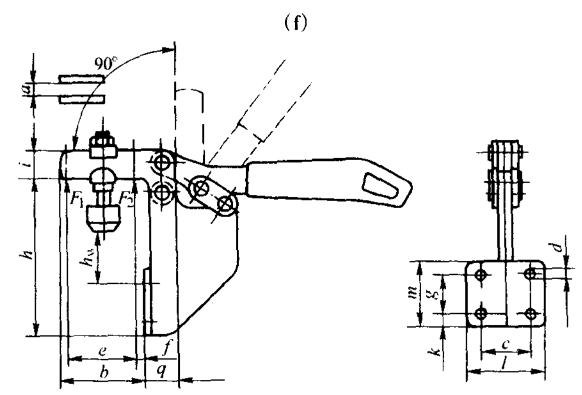
(e)

图 7.4-24　手动杠杆 – 铰链夹紧器



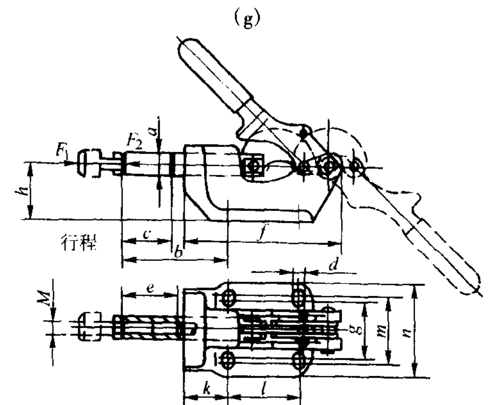
规格	F_1 /kN			h_w		[G]	尺寸 /mm																		
							a	b	b_4	c	c_2	c_3	c_6	d	e	f	g	h	h_6	i	l	m	q	s	α
2	2.5	130	85	-12~9	M6×50	320	6.5	57	31	20	9	37	1.0	7.1	30	21	M6	25	33.0	15	48	32	13	5	120°
4	5.0	215	148	-13~15	M12×80	1 250	12.2	88	52	30	15	60	5.0	8.5	—	90	M8	44	57.0	24	65	45	23	5	120°
6	6.0	265	182	-21~36	M12×110	2 130	12.2	95	60	45	15	75	2.5	10.5	—	110	M10	65	79.5	30	78	52	32	5	120°
8	12.0	305	228	-10~42	M16×110	4 050	12.2	132	76	55	20	95	5.0	12.5	—	140	M12	71	90.0	36	108	75	42	6	120°

(f)



规格	F_1 /kN	F_2 /kN			h_w		[G]	尺寸 /mm												
								a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	q
2	1.0	1.2	88.5	176	20~29	M6×35	245	6	52	25.5	5.5	35	10	20	74	13	6	37.0	32	12
3	1.8	2.5	86.0	221	6~18	M8×45	390	8	58	28.5	6.5	40	8	24	71	15	7	42.5	38	23

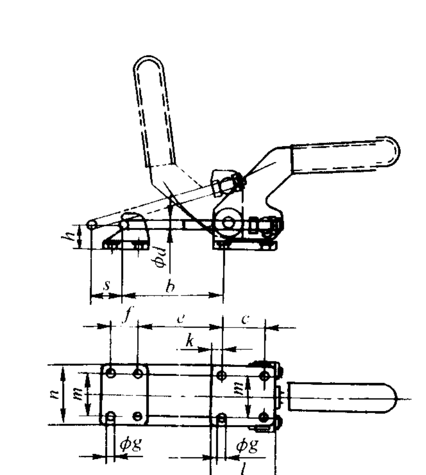
(g)



规格	F_1 /kN	F_2 /kN				[G]	尺寸 /mm												
							a	b	c	d	e	f	g	h	k	l	m	n	M
3	4	4	107	191	M8×35	540	12	72	32	6.5	30	96	36	30	28	41	44	60	M8
5	10	10	134	245	M12×50	1 115	16	98	40	8.5	50	122	41	38	45	41	50	70	M12
7	25	25	180	305	M12×50	2 840	22	105	50	11.0	50	157	57	55	44	70	65	94	M12

(h)

续图 7.4-24



规格	/kN	调整距离 /mm			[G]	尺 寸 /mm											
						b	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*k*	*l*	*m*	*n*	*s*
4	15	62	122	200	1 250	88	45	10	38 ~ 90	28	8.5	26	11	68	45	64	44
5	27	80	150	255	2 130	95	57	12	32 ~ 112	35	10.5	32	16	86	57	80	70

(i)

续图 7.4-24

图 7.4-25 第一类、第二类杠杆–铰链夹紧机构的派生形式

2.8.2 气动与液压夹紧机构

(1) 气动与液压夹紧机构的分类及特点

气动夹紧机构是以压缩空气为传力介质、推动气缸动作以实现夹紧作用的机构。液压夹紧机构是以压力油为传力介质、推动液压缸动作以实现夹紧作用的机构。两者的结构和功能相似，主要是传力介质不同。

气动和液压夹紧机构主要有以下几类：

气动(液压)夹紧机构

- 气动(液压)夹紧器
- 气动(液压)杠杆夹紧器
- 气动(液压)斜楔夹紧器
- 气动(液压)撑圆器
- 气动(液压)拉紧器
- 气动(液压)楔-杆杠夹紧器
- 气动(液压)铰链-杠杆夹紧器
- 气动(液压)杠杆-铰链夹紧器
- 气动(液压)凸轮-杠杆夹紧器
- 气动(液压)杠杆-杠杆夹紧器

其典型结构、性能、使用场合见表 7.4-6。

通常，气动夹紧机构所使用的压缩空气压力为 0.4 ~ 0.6 MPa，液压夹紧机构所使用的油压一般为 3 ~ 8 MPa，国外有的也用到 25 ~ 50 MPa。

在焊接工装夹具中，气动夹具的应用远比液压夹具广泛。这是因为气动夹具有如下显著的优点。

1) 空气在大气中可以取之不竭，无介质应用损失和供应上的困难，同时可以将用过的空气直接放入大气，处理方便，万一管路有泄漏，除引起能量损失外，不致产生不利于工作的严重影响。

2) 空气黏度很小，在管道中压力损失较小，一般，其阻力损失不到油路损失的千分之一，因此，压缩空气便于集中供应和远距离输送。

3) 压缩空气工作压力较低，可降低对气动元件材质和制造精度方面的要求，因而结构简单、容易制造、成本低廉。

4) 气动动作迅速，反应快，操作控制方便，元件便于标准化，容易集中控制、程序控制和实现工序自动化。

5) 气动介质清洁，管道不易堵塞，维护简单，也不存在介质变质、补充、更换等问题。



表 7.4-6　气动（液压）夹紧机构的典型结构、性能及使用场合

名称	结构举例	说明
气动（液压）夹紧器	(a) (b) (c) (d)	气动（液压）夹紧器是通过气缸（液压缸）的直接作用夹紧焊件的机构，其夹紧力即为气缸（液压缸）的推力。其中图 a 夹紧器国内已有商品供应，规格较多
气动（液压）杠杆夹紧器	(a) (b) 薄膜式气缸 (c) (d)	是气缸（液压缸）推力通过杠杆进一步扩力或缩力后实现夹紧作用的机构，形式多样，适用范围广，在装焊生产线上应用较多
气动（液压）斜楔夹紧器	气缸	是气缸（液压缸）推力通过楔进一步扩力后实现夹紧作用的机构，扩力比较大，可自锁，但夹紧行程小，机械效率低，在装焊作业中应用较少
气动（液压）撑圆器	A A A—A	与手动撑圆器相比，推撑力大，筒周受力均匀，但体积大，机动性差，一般不能自锁，主要用于中小壁厚、大径筒节的对接和整形



续表 7.4-6

名称	结构举例	说明
气动（液压）拉紧器	气缸 (a)　(b)	通过气缸或液压缸的作用，将焊件拉拢或拉紧，出力大，不能自锁，用于厚、大件的装焊作业
气动（液压）楔-杠杆夹紧器	卡头 (a) A　A　A—A　拨销 (b)　(c)	气缸（液压缸）推力通过楔扩力后，再经杠杆进一步扩力或缩力，实现夹紧作用。结构形式多样，能自锁，省能源，在装焊作业中应用较广泛
气动（液压）铰链-杠杆夹紧器	(a) 气缸活塞杆 (b) 气缸活塞杆 (c)　(d)	气动（液压）铰链－杠杆夹紧器是气缸（液压缸）推力首先通过铰链连接板的扩力，再经杠杆进一步扩力或缩力后，实现夹紧作用的机构。其扩力比大、机械效率高、夹头开度大，但一般不具备自锁性能，多用于动作频繁、夹紧速度快、大批量生产的场合



续表 7.4-6

名称	结构举例	说明
气动（液压）杠杆-铰链夹紧器	(a) (b) 气缸活塞杆 (c) (d)	气动（液压）杠杆-铰链夹紧（液压缸）器是通过杠杆与连接板的组合，将气缸力传递到焊件上实现夹紧的机构。其扩力比大、有自锁性能、机械效率高、夹头开度大、形式多样，多用于动作频繁的大批量生产场合。其中图 d 夹紧器国内已有商品供应，尤其是气动的，品种规格较多
气动（液压）凸轮-杠杆夹紧器		气缸（液压缸）力经凸轮或偏心轮扩力后，再经杠杆扩力或缩力来实现夹紧。有自锁性能，扩力比大，但夹头开度小、夹紧行程不大，在装焊作业中应用较少
气动（液压）杠杆-杠杆夹紧器		气缸（液压缸）推力通过两级杠杆传力夹紧焊件，无自锁性能

6）使用安全可靠。可在高温、振动、腐蚀、易爆等恶劣环境下工作，并便于实现过载保护。

但是气动也有如下缺点。

1）由于空气具有可压缩性，使工作速度不易稳定，因而外载变化对速度影响较大，也难于准确地控制与调节工作速度。

2）由于压缩空气压力较低，与液压相比，在同一出力下的结构尺寸大很多。

根据焊接工装夹具的使用要求与特点，上述缺点中的第二项所构成的影响较大。

与气动相比，液压的主要优点是：同一结构尺寸下的出力很大，工作平稳，耐冲击，可以准确地控制速度，外载的变化对工作速度几乎没有影响。

根据液压的这些优点，液压夹紧机构多用在对夹紧速度有要求的场合，以及要求夹紧力很大而安装空间尺寸受到限制的地方。

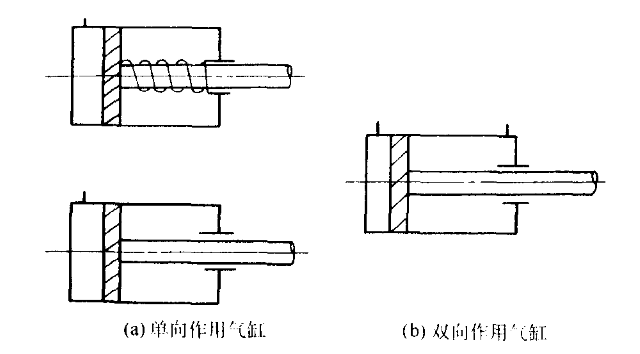
两种机构中的重要组成元器件，如气缸和液压缸，压缩空气站和液压泵站，以及与其配套的各种控制阀和辅件，在国内外均有标准化和系列化的产品。以焊接工装中应用最多的气缸为例，就有重型、轻型、小型、微型等类别，每一类别都有各自的系列，大都符合 ISO 标准，就连气缸用的支座和活塞杆的接头也有相应的系列标准。这就为用户的直接选用和零件的更换、维修保养提供了极为便利的条件。

我国生产气动和液压元器件的专业化工厂已有多家。产品种类齐全，规格很多，其主要性能多数达到或接近国际先进水平，完全可以满足气动和液压夹紧机构的使用要求。读者在设计时，应尽量优先选用。

（2）气缸与液压缸的出力计算和选用

1）气缸出力计算　在气动夹紧机构中，常用的主要是单向作用气缸和双向作用气缸。单向作用气缸仅在活塞的一侧有一个进排气口，活塞靠外力、自重或弹簧复位（图 7.4-26）；双向作用气缸是在活塞两侧各有一个进排气口，利用

压缩空气使活塞完成双向往复（图7.4-26b）。这两种气缸的出力计算公式是不相同的，见表7.4-7。



(a) 单向作用气缸 (b) 双向作用气缸

图7.4-26 气缸种类

表7.4-7 气缸出力计算公式

活塞运动速度/(m/s)	单向作用气缸	双向作用气缸	
		推力	拉力
$v<0.2$	$F=0.65D^2p-R$	$F=0.65D^2p$	$F=0.6D^2p$
$v=0.2\sim0.5$	$F=(0.65\sim0.4)D^2p-R$	$F=(0.65\sim0.4)D^2p$	$F=(0.6\sim0.37)D^2p$

注：F 为气缸出力，N；D 为气缸内径，mm；p 为气缸工作压力，MPa；0.65、0.6、0.65~0.4、0.6~0.37为考虑气缸惯性阻力、背压阻力、活塞及活塞杆密封处摩擦阻力等影响的系数；R 为弹簧反作用力，N，$R=\frac{Gd_1^4}{8D_1^3n}(L+s)$，其中 G 为材料的抗剪模数，MPa/mm²；d_1 为弹簧钢丝直径，mm；D_1 为弹簧平均直径，mm；n 为弹簧有效圈数；L 为弹簧的预压缩量，mm；s 为活塞行程，mm。

2）液压缸出力计算 与气缸一样，液压缸也有单向作用和双向作用之分，它们的出力计算公式见表7.4-8。

表7.4-8 液压缸出力计算公式

单向作用液压缸	双作用液压缸		
	推力	拉力	活塞杆差动前进
$F=0.71D^2p-R$	$F=0.71D^2p$	$F=0.71(D^2-d^2)p$	$F=0.71d^2p$

注：F 为液压缸出力，N；D 为液压缸内径，mm；p 为液压缸工作压力，MPa；d 为活塞杆直径，mm；R 为弹簧反作用力，N，其计算公式同表7.4-7所列；0.71为考虑活塞及活塞杆在密封处摩擦阻力的系数。

因为在焊接工装夹具中，多要求液压缸为匀速运动，而且回油一般直接流入油箱，所以液压缸运动的惯性阻力和回油阻力可以忽略不计。

3）气缸和液压缸的选用 在焊接工装夹具中，主要根据出力、活塞行程、安装方式来选用标准化的气缸和液压缸。选用的程序和注意事项如下。

① 根据外部工作力的大小，先确定活塞杆上的推力或拉力。液压缸的出力比较稳定，但气缸的出力随工作速度的不同而有很大的变化，速度增高时，则由于受背压等因素的影响，出力将急剧降低。通常应根据外部工作力的大小，乘以备用系数1.15~2，来确定气缸的内径。

② 确定活塞杆的行程，即确定气缸或液压缸活塞所能移动的最大距离。行程的长短与使用场合有关，也受气缸和液压缸结构和加工工艺的影响，特别是采用小径长行程气缸和液压缸时，要充分考虑制造的可能性和有无市售产品。

③ 要根据夹具的结构形式、运动要求来确定气缸和液压缸的安装形式。气缸的安装形式有多种，见表7.4-9。当活塞杆仅做直线运动时，则常选用耳座式和法兰式的安装形式；当活塞杆做直线运动的同时又做圆弧运动时，则选用轴销式的安装形式。

液压缸的安装形式与气缸的相同，只不过头部轴销和中间轴销的安装形式，在出力很大的液压缸中应用较少。

④ 根据焊件的结构情况，选择有、无缓冲性能的气缸。对于几何尺寸较大，板材较厚，刚性较好的焊件，由于对气缸夹紧时的冲击作用反应不太敏感，从经济实用的角度出发，应选用无缓冲性的气缸，反之，就要选用带缓冲性能的气缸。

⑤ 尽量选用标准化的气缸和液压缸。前已述及，气缸、液压缸甚至气缸活塞伸出端的连接头、气缸支座以及管接头等都已经标准化、系列化，而且配套供应，因此，应该一并选用。另外，目前一些生产厂家还推出了带开关、带电控阀以及二者全带的集成式气缸。带开关的气缸，缸筒外面装有磁性开关，可调节气缸的中间行程，使用方便；带电磁阀的气缸，使缸阀一体化，结构紧凑，节省气路，维修操作方便；二者全带的气缸，不仅具有前两者的功能和优点，而且结构更加紧凑，在气动执行机构系统中，更便于实现自动化。上述新型气缸，在气动夹紧机构的设计中，可根据对夹具机械化、自动化水平的要求，酌情选用。各种气缸、液压缸的技术参数及使用性能，可参见相关文献和有关生产厂家的产品样本。

(3) 斜楔扩力机构

在气动（液压）斜楔夹紧器、气动（液压）楔-杠杆夹紧器等气动、液压夹紧机构中，都有一级斜楔扩力机构，为此，需对斜楔扩力性能予以讨论，以便能正确地设计这类夹紧机构。

1）斜楔扩力的类型 在焊接工装夹具中常用的斜楔扩力形式有五种类型，其类型简图及相应的结构图举例如图7.4-27所示。其中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型为无移动柱塞式，Ⅳ、Ⅴ型为有移动柱塞式。

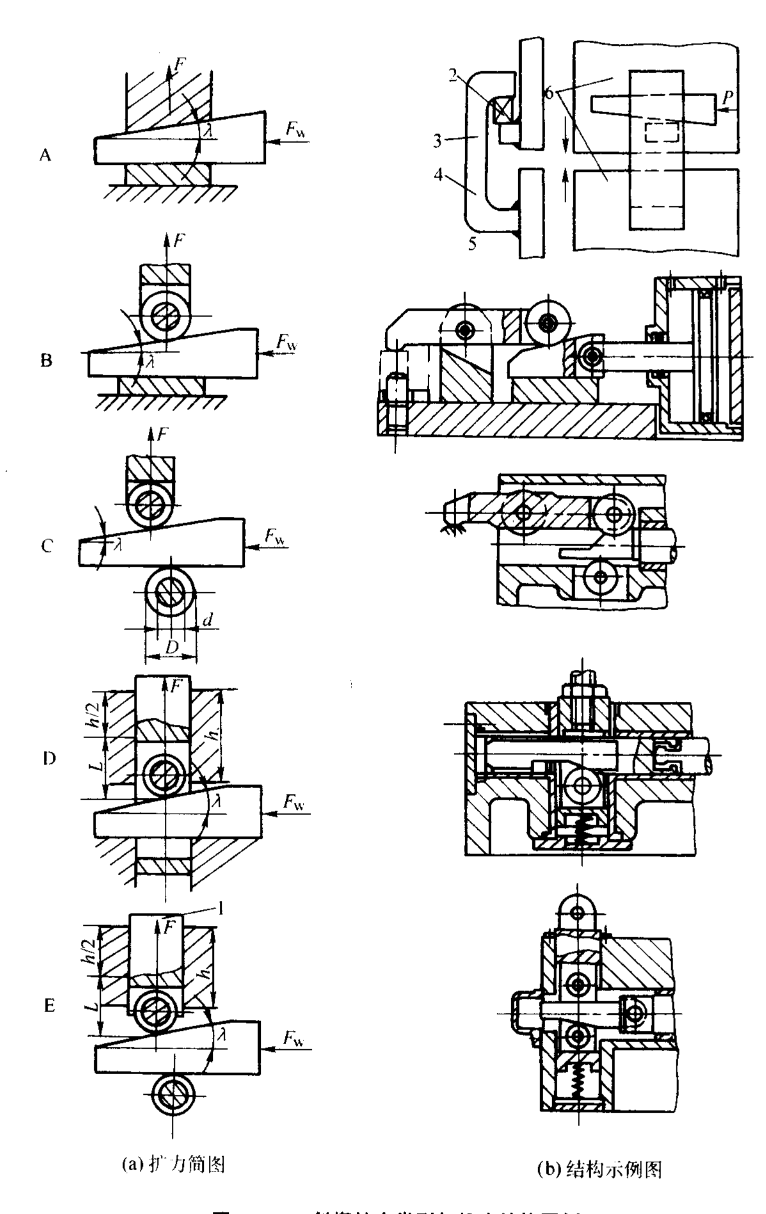
表7.4-9 气缸的安装形式

安装形式			简图	说明
固定式	通用气缸			基本形式
固定式	耳座式	轴向耳座		耳座上承受力矩，气缸直径越大，力矩越大
固定式	耳座式	切向耳座		耳座上承受力矩，气缸直径越大，力矩越大
固定式	法兰式	前法兰		前法兰紧固，安装螺钉受拉力较大
固定式	法兰式	后法兰		后法兰紧固，安装螺钉受拉力较小

续表 7.4-9

安装形式		简　图	说　明	安装形式		简　图	说　明
轴销式（摆动）	尾部轴销		尾部轴销。气缸可以摆动，活塞杆的挠曲比头部轴销、中间轴销形式大	轴销式（摆动）	中间轴销		活塞杆的挠曲比尾部轴销形式小，而比头部轴销形式大
	头部轴销		活塞杆的挠曲比尾部和中间轴销形式小				

注：1. 法兰式又叫凸缘式；
2. 气缸如以安装形式来分类，除表列几种形式外，尚有回转式气缸和嵌入式气缸（气缸筒直接做成机体）。



(a) 扩力简图　　(b) 结构示例图

图 7.4-27　斜楔扩力类型与相应结构图例

A—Ⅰ型；B—Ⅱ型；C—Ⅲ型；D—Ⅳ型；E—Ⅴ型；
1—柱塞；2—斜楔；3—挡块；4—拉铁；5—工艺焊缝；6—焊件

由图 7.4-27 知，Ⅰ型是一种斜楔面和基面均具有平面滑动摩擦性质的单斜楔面扩力机构；Ⅱ型是一种斜楔面带动滚子，滚子内孔和滚子转轴间具有滑动摩擦，基面具有平面滑动摩擦性质的单斜楔面扩力机构；Ⅲ型是一种斜楔面和基面均带动滚子，而滚子内孔和滚子转轴间具有滑动摩擦的单斜楔面扩力机构；Ⅳ型是一种斜楔面带动滚子，而移动柱塞受双头导向的单斜楔面扩力机构；Ⅴ型是一种斜楔面和基面均带动滚子而移动柱塞受单头导向的单斜楔面扩力机构。

2）斜楔夹紧力计算　上述五种斜楔扩力类型的夹紧力计算公式见表 7.4-10（参见图 7.4-27）。

表 7.4-10　斜楔夹紧力的计算公式

斜楔扩力类型	夹紧力计算公式
Ⅰ	$F=\dfrac{F_w}{\tan(\lambda+\phi_1)+\tan\phi_2}$
Ⅱ	$F=\dfrac{F_w}{\tan(\lambda+\phi_{1n})+\tan\phi_2}$
Ⅲ	$F=\dfrac{F_w}{\tan(\lambda+\phi_{1n})+\tan\phi_{2n}}$
Ⅳ	$F=\dfrac{1-\tan(\lambda+\phi_{1n})\tan\phi_3}{\tan(\lambda+\phi_{1n})+\tan\phi_2}F_w$
Ⅴ	$F=\dfrac{1-\tan(\lambda+\phi_{1n})\tan\phi_{3n}}{\tan(\lambda+\phi_{1n})+\tan\phi_{2n}}F_w$

注：F 为夹紧力，N；F_w 为作用在斜楔上的力，N；λ 为斜楔的升角，即楔角，(°)；ϕ_1 为楔斜面上的摩擦角，一般在 5°43′～8°32′间选取；ϕ_2 为楔基面上的摩擦角，一般在 5°43′～8°32′间选取；ϕ_{1n} 为滚子作用在斜楔斜面上的当量摩擦角（°），$\tan\phi_{1n}=\dfrac{d}{D}\tan\phi'_1$，且 $\tan\phi'_1$ 为上滚轮转轴与轴孔之间的滑动摩擦因数，d 为滚子的轴径，mm，D 为滚子的外径，mm；ϕ_{2n} 为滚子作用在斜楔基面上的当量摩擦角，(°)，$\tan\phi_{2n}=\dfrac{d}{D}\tan\phi'_2$，且 $\tan\phi'_2$ 为下滚轮转轴与轴孔之间的滑动摩擦因数；ϕ_3 为移动柱塞导向时导向孔对柱塞的摩擦角，一般在 5°43′～8°32′间选取；ϕ_{3n} 为移动柱塞与导向孔的当量摩擦角（°），$\tan\phi_{3n}=\dfrac{3L}{h}\tan\phi_3$，$L$ 为柱塞导向孔的中点至楔斜面的距离，h 为导向孔的长度。

根据表 7.4-10 所列公式，算出各种斜楔扩力类型的扩力比 i_p $(=\dfrac{F}{F_w})$，见表 7.4-11。

为了使斜楔在夹紧状态下具有自锁性能，则楔角 λ 应不大于表 7.4-12 所列各值。但是为了使斜楔在保证自锁的前题下又有较高的效率，则楔角应取大值。

表 7.4-11　各类斜楔的扩力比

不同扩力类型的扩力比 / λ/(°)	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
	i_p				
5	3.47	4.20	5.31	4.41	5.16
7	3.07	3.67	4.46	3.58	4.31
10	2.62	3.05	3.59	3.02	3.42
15	2.19	2.37	2.68	2.29	2.51

注：根据 $d/D=0.5$、$L/H=0.7$、摩擦因数均为 0.1 算出。

表 7.4-12　各类斜楔的自锁条件

斜楔扩力类型	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
$\lambda\leqslant$	11°25′	8°33′	5°42′	8°33′	5°42′

注：根据 $d/D=0.5$、$L/h=0.7$、摩擦因数均为 0.1 算出。

3）斜楔扩力机构的设计　设计斜楔扩力时，应注意如下问题。

① 要求斜楔工作表面耐磨，能承受较大的冲击力，在力的作用下不发生开裂和变形。通常斜楔采用 45、20Cr、T7 等钢种来制作，并进行热处理使其表面有一定的硬度而内部有较好的韧度。

② 对于手动扩力的斜楔，其工作面的表面粗糙度不高于 R_a12.5 μm；对于机动扩力的斜楔，其工作面的表面粗糙度不高于 R_a3.2 μm。应特别注意，不要为了提高自锁性能而将斜楔的工作表面制作得很粗糙。

③ 设计手动斜楔扩力机构时，一定要保证自锁，但在焊接过程中由于焊件的变形，会使斜楔夹得更紧，以致焊后斜楔难以从焊件中退出，因此，在保证自锁的前提下，应尽量将斜楔升角设计得大一些。由于同一原因，在设计机动斜楔扩力机构时，若斜楔是自锁的，应将退楔力大于进楔力，这样才容易将斜楔退出。

在松楔时，若能沿斜楔退出方向先给以冲击力，会有利于斜楔的退出，因此在设计气动或液压斜楔扩力机构时，斜楔与活塞杆的接头常做成图 7.4-28 所示的形式。由于在斜楔上为活塞杆留有一段空程 L，因而在松楔时，使斜楔先受到冲击力的作用，以利于将斜楔退出。

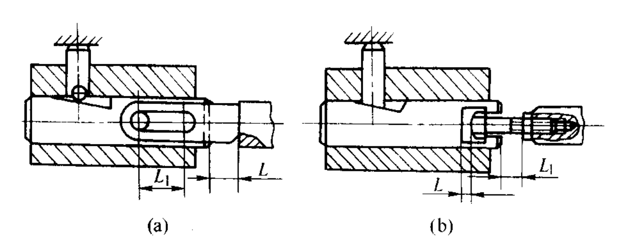


图 7.4-28　斜楔与活塞杆的连接形式

$L_{min}=8$ mm　$L<L_1$

④ 通常将楔斜面设计成具有不同楔角的两段，前一段采用大楔角以获得较大的行程，后一段采用小楔角以获得较大的扩力比并保证自锁。

⑤ 设计气动、液压斜楔扩力机构时，如果不要求自锁夹紧，可将斜楔的升角取得大一些，一般取 15°～30°，甚至达 45°。这样可获得较大的行程和较高的效率。另外，为了增加使用寿命，提高传动效率，应尽量采用滚动摩擦结构，如图 7.4-29 所示。

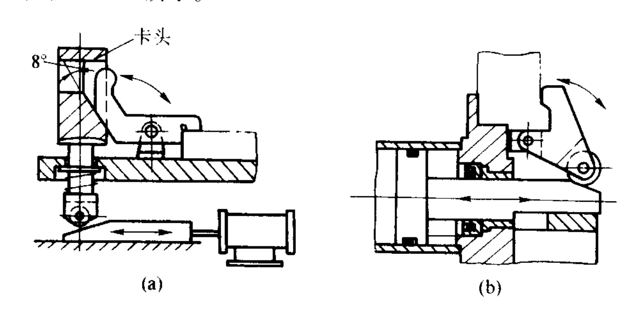


图 7.4-29　采用滚动摩擦结构的斜楔扩力机构

⑥ 在大批量生产中，多采用机动的斜楔扩力机构，其中以气动应用最多。为了提高工作效率，便于焊件装卸，设计时应尽量使各个机构相互联动。如图 7.4-30 所示的斜楔－杠杆夹紧器，杠杆 1 的就位和夹紧与斜楔 5 的进退采用了联动方式。松开焊件时，斜楔 5 向右推进，顶销 6 下落，

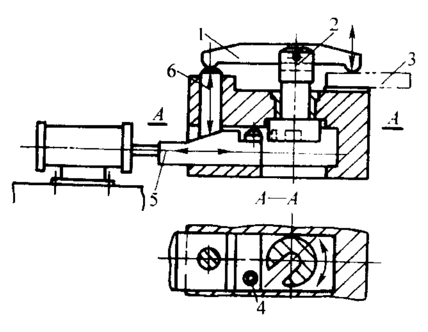


图 7.4-30　具有联动作用的斜楔－杠杆夹紧器

1—杠杆；2—立轴；3—焊件；
4—拨销；5—斜楔；6—顶销



焊件3松夹。接着，通过拨销4的作用，使杠杆1随立轴2转动90°，腾出装卸空间。夹紧焊件时，其动作程序相反。

在保证自锁的前提下，斜楔的夹紧行程一般都很小。夹紧行程小，对焊件装卸是不利的。为了解决这一矛盾，前已述及可将斜楔的斜面做成不同升角的两段，如果这样仍不能满足行程需要，可采用单独动作的斜楔扩力机构。如图7.4-31所示，气缸1通过杠杆系统可使夹头3获得较大的行程，从而有利于焊件4的装卸和准确定位。气缸2带动斜楔动作则可使夹头获得较大的夹紧力，以保证焊件在焊接过程中不发生变形。

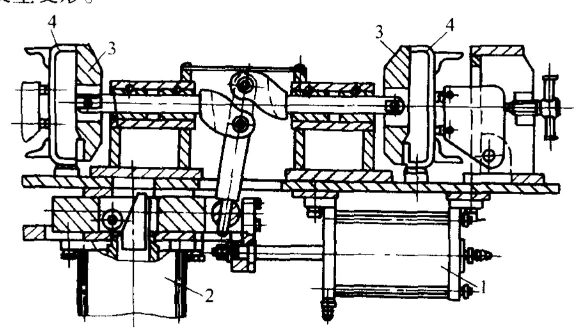


图7.4-31 单独作用的气动斜扩力紧机构
1—装配气缸；2—夹紧气缸；3—夹头；4—焊件

(4) 铰链扩力机构

1) 铰链扩力机构的形式 在气动（液压）铰链-杠杆夹紧器中，气缸（液压缸）的出力首先经铰链机构（铰链连接板）扩力，然后再经杠杆扩力或缩力来实现夹紧。

利用铰链扩力机构进行扩力，扩力比大，摩擦损失小，但一般不具备自锁性能，因此，这种机构多用在要求动作迅速、效率较高、作业频繁的气动夹具中。

铰链扩力机构有五种类型，其工作原理图和对应的结构示例图见图7.4-32所示。

图7.4-32a所示是单臂单作用铰链扩力机构。臂的两头是铰链连接，其中一头带滚子，另一头与夹紧杠杆铰接，并推动该杠杆绕支点旋动而起夹紧作用，称为Ⅰ型铰链扩力机构。图7.4-32b所示是双臂单向作用的铰链扩力机构。双臂两头是铰链连接，两臂之间有一个共同的连接铰链，其中一臂的另一头通过铰链的支座与夹具体相连接，而另一臂的另一头与夹紧杠杆铰接，并推动该杠杆绕支点旋动而起夹紧作用，称为Ⅱ型铰链扩力机构。图7.4-32c所示是双臂单向作用带移动柱塞的铰链扩力机构。双臂的两头均是铰链连接，两臂之间有一个共同的连接铰链，其中一臂的另一头通过铰链支座与夹具体相连接，而另一臂的另一头则与移动柱塞铰接，并推动柱塞而起夹紧作用，称为Ⅲ型铰链扩力机构。图7.4-32d所示是双臂双向作用的铰链扩力机构，两臂之间有一个共同的连接铰链，两臂的另一头与相应夹紧杠杆铰接，并推动该杠杆旋动而起夹紧作用，称为Ⅳ型铰链扩力机构。图7.4-32e是双臂双向作用带移动柱塞的铰链扩力机构。两臂之间有一个共同的连接铰链，两臂的另一头通过带铰链的移动柱塞起夹紧作用，称为Ⅴ形铰链扩力机构。

2) 铰链扩力机构的夹紧力计算 各类铰链扩力机构其连接臂处的夹紧力计算公式见表7.4-13所示（参见图7.4-32）。

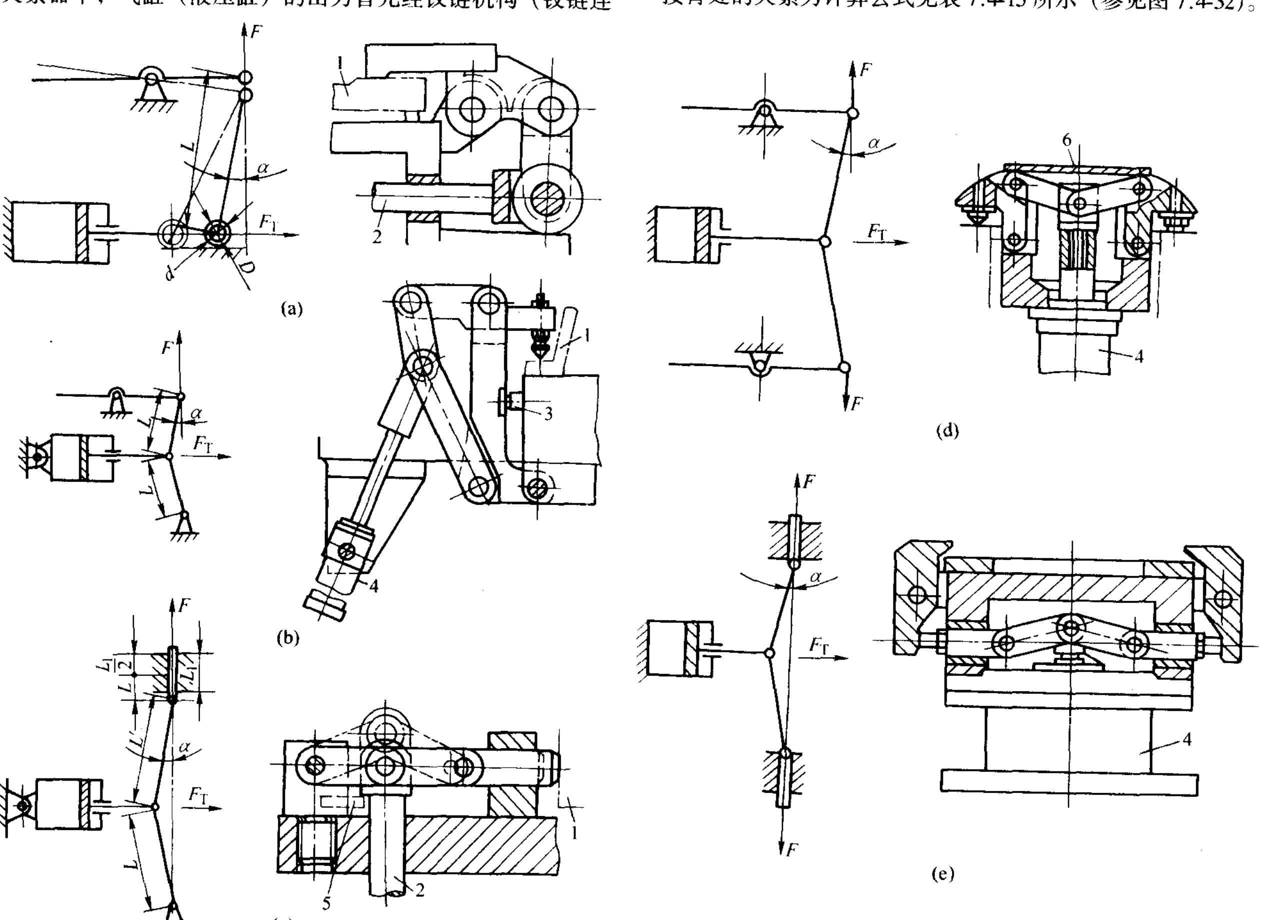


图7.4-32 铰链扩力机构类型与相应结构图例
(a) Ⅰ型；(b) Ⅱ型；(c) Ⅲ型；(d) Ⅳ型；(e) Ⅴ型
1—焊件；2—气缸活塞杆；3—挡块；4—气缸；5—挡销；6—顶盖

表 7.4-13　铰链扩力机构夹紧力计算公式

铰链扩力类型	夹紧计算公式
Ⅰ	$F=\dfrac{F_T}{\tan(\alpha+\beta)+\tan\phi_{1n}}$
Ⅱ	$F=\dfrac{F_T}{2\tan(\alpha+\beta)}$
Ⅲ	$F=\dfrac{F_T}{2}\left[\dfrac{1}{\tan(\alpha+\beta)}-\tan\phi_{2n}\right]$
Ⅳ	$F=\dfrac{F_T}{\tan(\alpha+\beta)}$
Ⅴ	$F=F_T\left[\dfrac{1}{\tan(\alpha+\beta)}-\tan\phi_{2n}\right]$

注：F 为夹紧力，N；F_T 为推动力，N；α 为夹紧状态时铰链臂的倾斜角，(°)；$\tan\phi_{1n}$ 为铰链孔滚轮外径处的当量摩擦因数，且 $\tan\phi_{1n}=\dfrac{d}{D}\tan\phi_1$，$d$ 为铰链孔直径，mm，D 为滚轮外径，mm，$\tan\phi_1$ 为铰链孔处的摩擦因数；β 为铰链孔的反力方向与铰链孔中心连线的夹角，(°)，$\sin\beta=\dfrac{d}{L}\tan\phi_1$，$L$ 为铰链孔的中心距，mm；$\tan\phi_{2n}$ 为移动柱塞对导向孔的当量摩擦因数，$\tan\phi_{2n}=\dfrac{3L'\tan\phi_2}{L_1}$，$L'$ 为导向孔的中点至铰链中心的距离，mm，L_1 为导向孔长度，mm，$\tan\phi_2$ 为移动柱塞对导向孔的摩擦因数。

3）铰链扩力机构的工作行程、储备行程和受力点行程

① 工作行程　铰链扩力机构的工作行程是指铰链臂施力点在夹紧过程中沿其垂直方向移动的距离。

对Ⅰ、Ⅳ、Ⅴ型铰链扩力机构，如图 7.4-33a 所示，其工作行程

$$s_1=l(\cos\alpha-\cos\alpha_0)$$

对Ⅱ、Ⅲ型铰链扩力机构，如图 7.4-33b 所示，可近似为

$$s_1\approx2l(\cos\alpha-\cos\alpha_0)$$

式中，l 为铰链臂铰链孔中心的间距；α 为铰链臂在夹紧状态下的倾斜角；α_0 为铰链臂松夹时的初始角。

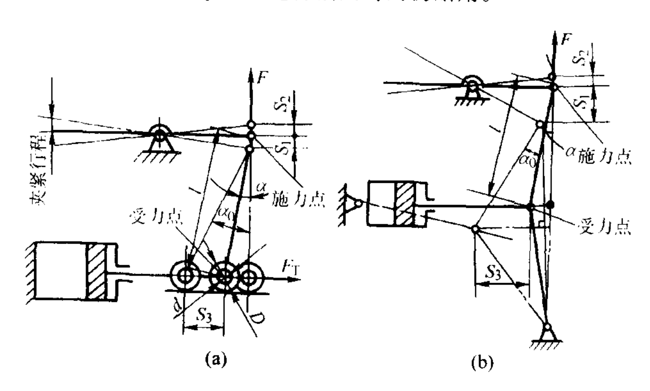


图 7.4-33　铰链扩力机构的行程计算

通常，总希望工作行程大一些，以适应不同厚度焊件的夹紧；并获得较大的开度，以利焊件装卸。

② 储备行程　铰链扩力机构的储备行程是指铰链臂的施力点从夹紧位置走到 $\alpha=0$ 的自锁位置时，施力点沿垂直方向移动的距离。

对Ⅰ、Ⅳ、Ⅴ型铰链扩力机构，如图 7.4-33a 所示，其储备行程

$$s_2=l-l\cos\alpha=Kl$$

对Ⅱ、Ⅲ型铰链扩力机构，如图 7.4-33b 所示，可近似为

$$s_2\approx2l-2l\cos\alpha=Kl$$

式中，K 为与 α 有关的系数，见表 7.4-14 所列。

表 7.4-14

α(°) ＼ 铰链扩力类型	Ⅰ、Ⅳ、Ⅴ	Ⅱ、Ⅲ
	K	
10	0.015	0.030
15	0.034	0.068
20	0.060	0.120
25	0.093	0.186
30	0.134	0.268

为了使各种铰链扩力机构正常工作，防止夹紧失效，必须使铰链臂的施力点有一定的储备行程。

③ 受力点行程　铰链扩力机构的受力点行程，是指铰链臂从初始位置移到夹紧位置时，其受力点沿水平方向移动的距离。受力点行程的大小与工作行程有关，在其他条件设定的情况下，工作行程越大，受力点的行程也越大。在气动和液压传动的铰链扩力机构中，受力点行程就是气缸和液压缸的作用行程，是进行结构设计必须已知的数据。通常，当铰链臂铰链孔中心的间距 l 及铰链臂的初始角 α_0 和夹紧时的倾斜角 α 已知时，对Ⅰ、Ⅳ、Ⅴ型铰链扩力机构（见图 7.4-33a），其受力点行程为

$$s_3=l(\sin\alpha_0-\sin\alpha)$$

对Ⅱ、Ⅲ型铰链扩力机构，其受力点行程通常也用上式作近似计算。

④ 铰链扩力机构的设计　铰链扩力机构的设计程序，与手动杠杆－铰链夹紧机构的设计相似。首先根据夹紧要求确定铰链扩力机构的类型，然后按照焊件的结构形式和夹紧位置，以及整体布局等因素，定出铰链板两铰链孔中心的间距，画出在松夹和夹紧状态下的机构位置图，并检查是否满足夹紧要求，是否有足够的工作行程、储备行程和受力点行程。在此基础上，再画出总装配图，定出各个零件的几何形状和尺寸，并进行必要的强度、刚度的计算与校核。与此同时，还要按照出力的大小、活塞的工作行程及气缸或液压缸的安装方式，选择标准气、液缸。完成上述工作后，还要检查扩力机构在运动过程中对其他构件是否存在干涉现象，在夹紧状态是否影响装焊作业的实施，在松夹状态是否影响焊件的装卸等，最后画出零件图。以上工作不可能一蹴而就，而要经过多次反复和修改才能完成。

通常，扩力机构的铰链板选用 Q235 钢制作，轴销多选用 45 钢制作，并经热处理，表面硬度 HRC40 左右。一般情况下，铰链处不另设轴套，也没有润滑油道。

由于气动和液压铰链扩力机构一般没有自锁性，其夹紧状态始终要受到原动力的作用才得以维持，为了生产安全，在气动和液压控制系统中，应有防范动力源突然切断而导致松夹的措施。

(5) 气动、液压夹紧机构的设计、选用和市售常用机构的结构与技术数据

在设计和选用气动、液压夹紧机构时，应注意如下问题。

① 气动、液压夹紧机构中的气动（液压）夹紧器、气动（液压）杠杆－铰链夹紧器，国内已有商品供应，品种规格较多，应以选用为主。其他气动、液压夹紧机构需根据使用要求自行设计，但进行设计时，除气缸、液压缸要根据出力、行程、安装方式向有关气、液压元件厂订货外，气、液压回路中的各种控制阀、附属元件、液压泵站等均有市售标准产品供应，读者可参阅相关文献及有关厂家的产品样本选

购即可。

② 尽可能使用气动夹紧机构，只有在安装空间狭小、要求夹紧力很大的场合才使用液压夹紧机构。

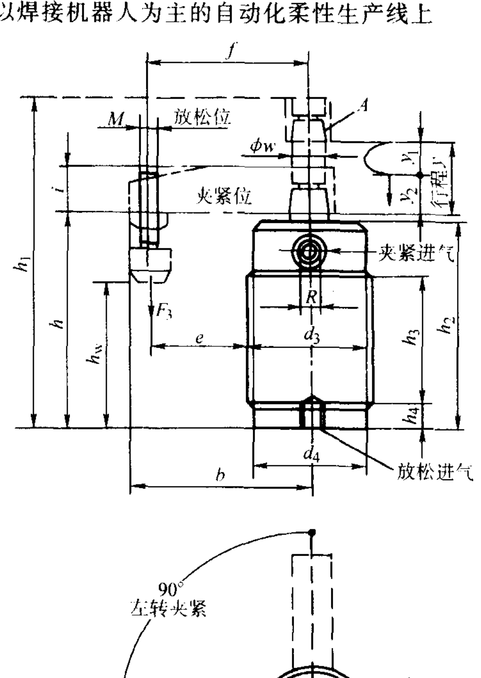
③ 用于薄板冲焊结构上的气动夹紧机构，若采用整体式和刚性较大的夹紧压头时，焊件反而不易压贴在胎模（定位器）上，并且易造成焊件表面的损伤。在这种场合下，宜采用分体式的夹紧技术，例如使用气动琴键式的夹紧机构（见 2.8.4 节的叙述）或用气袋充入压缩空气予以夹紧的软夹具。

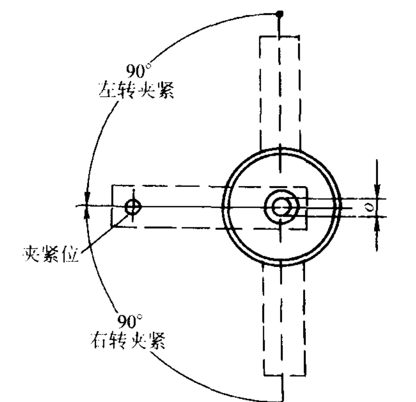
④ 若焊件刚性较大，又要求夹具具备预制反变形的功能，则宜采用液压夹紧机构。

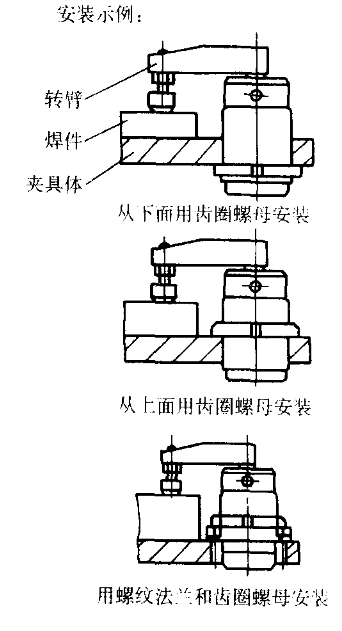
⑤ 各种液压夹紧机构的液压缸，最好不要倒置安装。

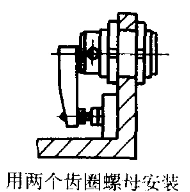
⑥ 对应用在以焊接机器人为主的自动化柔性生产线上的气、液压夹紧机构，为了实现其与机器人，焊件变位设备的协调动作，常采用以可编程序控制器（PLC）为主控单元的柔性控制系统，各个子程序对应于一个功能，对于不同的焊件，只需调用或修改不同的子程序即可，勿需重新编程。

市售常用的气动夹紧机构的结构及技术数据见图 7.4-34a、b、c、d，液压的夹紧机构见图 7.4-35a、b、c 和图 7.4-36。在图 7.4-35 转臂式液压夹紧机构中，图 7.4-35a 的安装方式为前法兰连接；图 7.4-35b 为后法兰连接；图 7.4-35c 为螺纹连接。它们的活塞杆头部均安装着厂家提供的标准转臂式压头（图中未画出），夹紧力视规格不同在 2 ~ 22 kN 之间，夹紧行程最小为 6 mm，最大为 15 mm。图 7.4-36 为杠杆 - 铰链式的液压夹紧机构，夹紧力视型号规格不同在 6 ~ 22.7 kN 之间。









规格	右旋	左旋	F_3 /kN	/g
25	×	×	0.17	450
32	×	×	0.27	550
40	×	×	0.45	700
50	×	×	0.70	850
63	×	×	1.10	1 000

b_{max}	d_3	直径 d_4	e	f	h	h_1	h_2	h_3	h_4	h_w	i	M	o	R	直径 w	活塞直径	旋转行程 y_1	夹紧行程 y_2	总行程 y
58	M40 × 1.5	38	30.0	50	74	118	70	35	10	49 ~ 57	16	M6	M8	M5	14	25	14	14	28
70	M50 × 1.5	48	35.0	60	83	132	79	40	15	48 ~ 61	19	M8	M8	G1/8	16	32	16	14	30
80	M55 × 1.5	53	42.5	70	87	135	83	45	15	52 ~ 65	19	M8	M8	G1/8	16	40	15	14	29

图 7.4-34　气动夹夹紧机构



b_{max}	d_3	直径 d_4	e	f	h	h_1	h_2	h_3	h_4	h_w	i	M	o	R	直径 w	活塞直径	旋转行程 y_1	夹紧行程 y_2	总行程 y
92	M65×1.5	62	47.5	80	92	145	87	50	15	42～62	25	M12	M10	G1/8	20	50	14	14	28
102	M80×1.5	77	50.0	90	97	152	92	56	15	47～67	25	M12	M10	G1/8	20	63	15	15	30

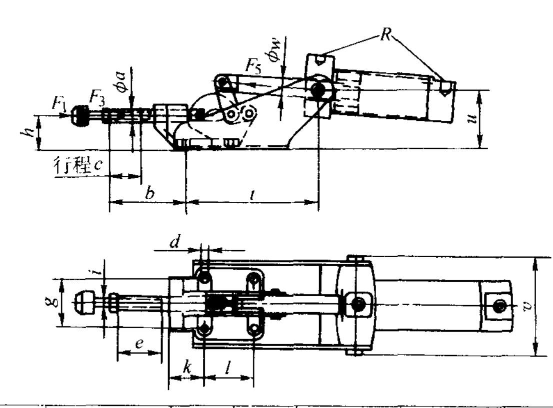
注：1. 活塞直径指压缩空气气压为 6 bar（1 bar = 10^5 Pa，下同）时可获得夹紧力 F_3 的气缸直径。

2. 只有在夹紧行程 y_2 时夹紧臂才会夹紧工件。

3. 在 A 处安装厂家提供的标准转臂。

4. 尺寸单位 mm，下同。

（a）



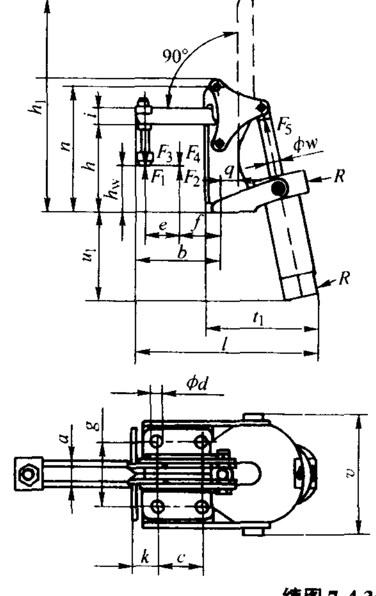
规格	F_1 /kN	F_3 /kN	F_5 /kN	Vn				/g
N_3	4.0	2.5	0.75	0.8	91	328	M8×35	1 800
3	4.0	2.5	0.75	0.8	91	328	M8×35	1 800
5	10.0	5.0	1.0	2.2	110	437	M12×50	3 400
7	25.0	10.0	1.8	4.5	150	533	M12×50	7 680

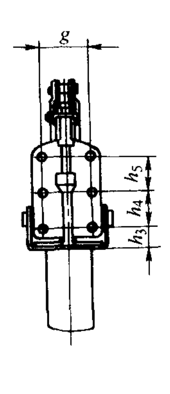
直径 a	b	c	直径 d	e	g	h	i	k	l	t	u	v	ϕw	气缸		R
														活塞直径	行程	
12	72	24	6.5	30	41	32.5	M8	28	41	125	56	84	16	40	62	G1/8
12	72	24	6.5	30	41	32.5	M8	28	41	125	56	84	16	40	62	G1/8
16	97	32	8.5	50	41	41.0	M12	45	41	322	38	84	16	50	100	G1/8
22	105	40	11.0	50	57	59.0	M12	44	70	404	49	114	16	63	125	G1/4

注：1. Vn 为 6 bar 气压时每来回冲程的气体消耗量，dm^3，下同。

2. 活塞直径指 6 bar 气压时可获得活塞推力 F_5 的气压直径，下同。

（b）





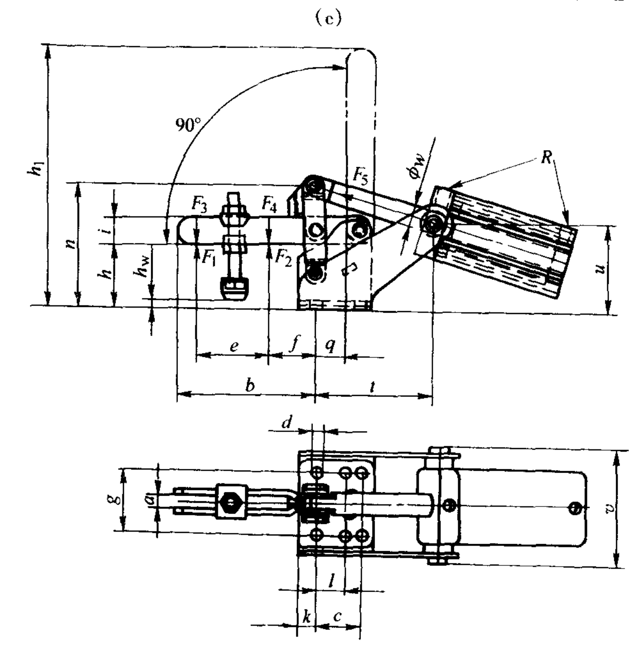
续图 7.4-34

规格	F_1 /kN	F_2 /kN	F_3 /kN	F_4 /kN	F_5 /kN	Vn				/g
2	1.0	1.2	0.7	1.0	0.30	0.26	170	130	M6×35	800
3	1.4	2.5	0.6	1.1	0.50	0.35	205	160	M8×45	1 100
4	2.0	3.0	1.5	2.2	0.75	0.80	260	220	M8×65	1 600

a	b	c	直径 d	e	f	g	h	h_1	h_3	h_4	h_5	h_w	i	k
6	56	12.5	5.5	27	24	27.0	65	145	16	12.5	12.5	37~46	12	16
8	82	16.0	6.5	42	30	25.4	72	185	18	16.0	—	38~50	18	16
10	102	32.0	8.5	52	40	45	100	240	22	32.0	32	50~79	20	18

n	q	R	t_1	u_1	v	直径 w	气缸	
							行程	活塞直径
94	8	M5	90	70	62	10	42	25
108	13	G1/8	105	90	70	12	52	32
144	20	G1/8	135	105	85	16	62	40

(c)



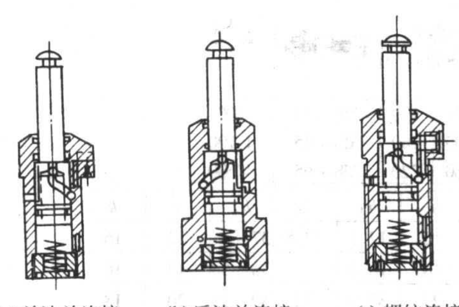
规格	F_1 /kN	F_2 /kN	F_3 /kN	F_4 /kN	F_5 /kN	Vn				/g
1	0.8	1.1	0.20	0.3	0.10	0.08	52	175	M5×30	610
2	1.0	1.2	0.70	1.0	0.30	0.26	64/66	200	M6×35	870
3	1.4	2.5	0.65	1.1	0.50	0.35	85	250/260	M8×45	1 160
4	2.0	3.0	1.50	2.2	0.75	0.80	100	290/315	M8×65	1 900

a	b	c	直径 d	e	f	g	h	h_1	h_w	i	k	l	n	q	t
5	38	16	4.5	19	14	24	22	96	-2~5	10	6.0	—	47	12	58
6	51	20	5.5	27	18	27	27	106	-1~8	12	5.5	12.5	56	13	53
8	80	20	7.1	43	27	32	36	157	2~14	18	7.5	—	74	16	63
10	100	32	8.5	52	35	45	45	194	-5~24	20	8.0	—	87	22	86

u	v	直径 w	气缸		R
			活塞直径	行程	
32	50	6	16	34	M5
41	62	12	25	41	M5
56	70	12	32	52	G1/8
64	84	16	40	62	G1/8

(d)

续图 7.4-34



(a) 前法兰连接　(b) 后法兰连接　(c) 螺纹连接

图 7.4-35 转臂式液压夹紧机构

2.8.3 磁力、真空、电动夹紧机构

(1) 磁力夹紧机构

1) 磁力夹紧机构的类型　磁力夹紧机构分永磁夹紧器和电磁夹紧器两种。

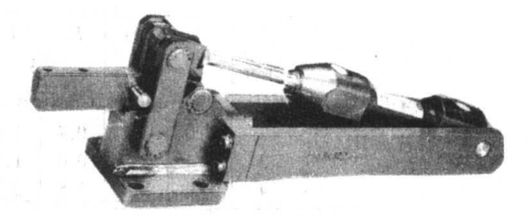


图 7.4-36 杠杆–铰链式液压夹紧机构

永磁夹紧器是用各种永久磁铁夹紧焊件的一种器具，其夹紧力有限，久用之后，磁力将减弱，但永磁夹紧器结构简单，不消耗电能，使用经济简便，宜用在夹紧力较小，不受冲击振动的场合。其外形及应用举例见图 7.4-37a、b、c。其中图 7.4-37a 夹紧器的夹紧角度可以调节；图 7.4-37b 夹紧器仅用于成 90°的夹紧；图 7.4-37c 夹紧器已有市售产品，用于 45°和 90°的夹紧，其上还带有隔磁开关，可轻松地吸附和释放焊件，技术数据见表 7.4-15。

(a)　(b)

(c)

图 7.4-37 永磁夹紧器及应用举例

表 7.4-15 三角式永磁夹紧器

型号	外形尺寸/mm			吸力/N	质量/kg
	斜边	直角边	厚度		
MSA 45	110	95	24	136	0.45
MSA46-HD	110	95	24	295	0.70
MSA47	150	130	31	263	1.00
MSA48-HD	150	130	31	590	1.40

永久磁铁常用铝镍钴系合金和铁氧体等永磁材料来制作，特别是后者中的锶钙铁氧体，其货源丰富，性能好，价格低廉，得到了广泛的应用。

电磁夹紧器是利用电磁力来夹紧焊件的一种器具，其夹紧力较大，由于供电电源不同，分为直流和交流两种。

直流电磁夹紧器，其电磁铁励磁线圈内通过的是直流电，所建立的磁通是不随时间变化的恒定值，在铁心中没有涡流和磁滞损失，铁心材料可用整块工业纯铁制作，吸力稳定，结构紧凑，在电磁夹紧器中应用较多。

交流电磁夹紧器，其电磁铁励磁线圈内通过的是交流电，所建立的磁通随电源频率而变化，因而磁铁吸力是变化的，工作时易产生振动和噪声，且有涡流和磁滞损耗，结构尺寸较大，故使用较少。

电磁夹紧器的应用举例见图 7.4-38。焊件筒体两端的法兰被定位销定位后，其定位不受破坏就是靠固定和移动式电磁夹紧器来实现的。

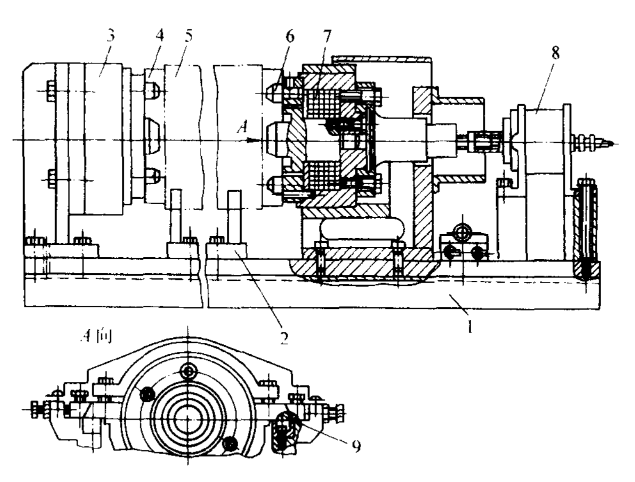


图 7.4-38 电磁夹紧器的应用

1—夹具体；2—V 形定位器；3—固定式电磁夹紧器（同时起横向定位作用）；4—焊件（法兰）；5—焊件（筒体）；6—定位销；7—移动式电磁夹紧器；8—气缸；9—燕尾滑块

2）电磁铁的设计 设计电磁铁时，首先要根据电磁夹具的要求，确定电磁铁的结构形式，然后根据所需要的电磁吸力以及磁铁与焊件间的气隙，计算铁心面积、励磁安匝数和线圈圈数。由于影响电磁铁工作的因素很多，如电磁铁本身的漏磁、铁心磁阻、焊件材质、焊件几何形状及表面粗糙度等都对电磁铁的吸力有影响，所以设计结果往往与实际有差别。因此设计时应留有适当裕度，然后在试制过程中对各有关参数进行必要的修改和调整。

电磁夹紧器所用的电磁铁主要有 Π 型和盘形两种形式（图 7.4-39），其中盘形电磁铁结构紧凑，加工方便，应用较多。

现以直流电磁夹紧器电磁铁为例，介绍其设计计算步骤。

① 根据使用要求确定磁力夹具电磁铁的形式。

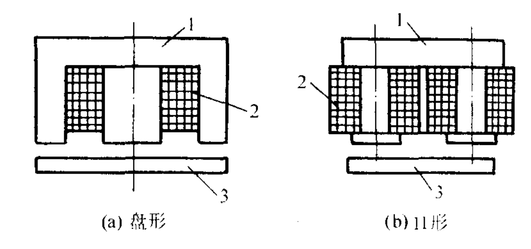


图 7.4-39 电磁铁的结构形式

1—铁心；2—线圈；3—焊件

② 根据工件的形状、尺寸、夹紧要求决定电磁铁的数量及布置。

③ 根据总夹紧力求出单个电磁铁的吸力：

$$F_0 = \frac{F}{n} K_1 K_2 K_3$$

式中，F_0 为单个电磁铁的吸力，N；F 为总夹紧力，N；n 为电磁铁的数量；K_1 为吸合系数，$K_1 = \frac{S_0}{S}$（其中 S 为电磁铁与焊件的吸合面积，S_0 为铁心的截面积），在电磁铁结构尺寸未得出之前，先给定一个值；K_2 为安全系数，根据夹具使用的工况条件，在1.5～3 之间选取；K_3 为工作情况系数，一般在 1～5 之间选取，在垂直状态吸附焊件时取大值，在水平状态吸附焊件时取小值。

④ 确定电磁铁的气隙 电磁铁吸附焊件时，必须在一定的距离内就能对焊件产生吸取作用，这个距离称初始工作气隙，其值在 2～20 mm 之间，根据焊件的大小及作业情况而定。当电磁铁与焊件吸合后，工作气隙显著缩小，一般在 0.2～0.5 mm 之间，其具体数值取决于焊件的表面粗糙度。

电磁铁由于其制造工艺原因，在铁心衔接处存在的气隙称结构气隙。由于气隙的存在，将大量消耗电磁铁的磁动势，所以在设计直流电磁铁时，最好将铁心设计成一个整体；在设计交流电磁铁的铁心时，其硅钢片尽量冲成一个整体。

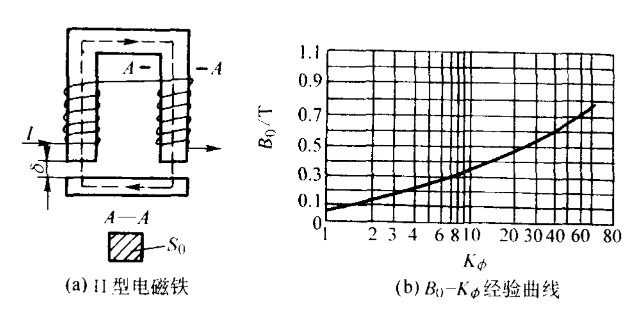


图 7.4-40 铁心截面的计算

⑤ 计算铁心截面积 若设计的是 Π 型电磁铁，两线圈串联（图 7.4-40a），并假定磁通在气隙和铁心中均匀分布，也不计漏磁，则 Π 型电磁铁的吸力 F_0 与铁心截面积的关系式为

$$F_0 = \frac{10^7}{4\pi} B_0^2 S_0$$

改写后为

$$S_0 = \frac{4\pi F_0}{10^7 B_0^2} \qquad (7.4\text{-}25)$$

式中，F_0 为电磁铁的吸力，N；S_0 为铁心的截面积，m^2；B_0 为气隙中的磁感应强度，T，可从图 7.4-40b 的经验曲线[❶]中查出，图中，K_ϕ 为电磁铁结构因素，$K_\phi = \frac{1}{100\delta} \times \sqrt{\frac{F_0}{9.8}}$，

❶ 参考张健民编的《工业机器人》，该书由北京理工大学出版社 1988 年出版。



式中 δ 为电磁铁的初始工作气隙，m。

⑥ 决定磁路的磁动势　为了简化计算，可假定磁路中的磁动势主要消耗在工作气隙上，而消耗在铁心、焊件及结构气隙中的磁动势约占总磁动势的15%～35%，因此总磁动势为

$$F_m = \frac{2B_0\delta}{\mu_0(1-\alpha)} \tag{7.4-26}$$

式中，F_m 为总磁动势，A[1]；α 为消耗系数，在0.15～0.35之间选取；μ_0 为空气磁导率，$\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}$ H/m。

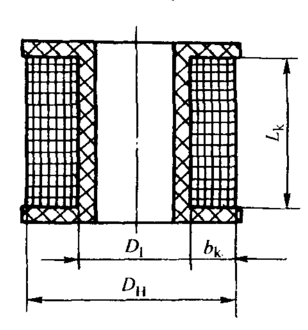


图 7.4-41　线圈的结构形式

⑦ 计算线圈尺寸　线圈的结构图见图7.4-41，线圈高度为 L_k，厚度为 b_k，高厚比 $\beta = \frac{L_k}{b_k}$，可按表7.4-16选取。

表 7.4-16　直流电磁铁高厚比 β

电磁铁形式	β 值
Π型	6～8
盘形	2～4

β 值选定后，按式（7.4-27）计算线圈的厚度

$$b_k = \sqrt{\frac{\rho\left(\frac{F_m}{2}\right)^2}{20\mu_m f_k \theta_y \beta^2}} \tag{7.4-27}$$

式中，b_k 为线圈厚度，mm；θ_y 为允许温度，℃，由工况温度而定；μ_m 为线圈散热系数，W/（cm²·℃），根据 θ_y 查表7.4-17得出；ρ 为导线电阻率，Ω·mm²/m，根据 θ_y 查表7.4-18得出；f_k 为填充系数，一般取0.45。

⑧ 计算线圈导线的直径　线圈导线直径按下式计算

$$d' = \sqrt{\frac{4\rho D_m F_m}{U}} \tag{7.4-28}$$

式中，d'为线圈导线的直径，mm；D_m 为线圈的平均直径，m，见图7.4-41，$D_m = D_1 + b_k$，其中 D_1 为线圈的内径，其值与铁心截面积有关；U 为线圈工作电压，V。

表 7.4-17　线圈散热系数

允许温度 θ_y/℃	线圈散热系数 μ_m/W·（cm²·K）$^{-1}$	允许温度 θ_y/℃	线圈散热系数 μ_m/W·（cm²·K）$^{-1}$
40	11.00×10^{-4}	65	12.04×10^{-4}
45	11.20×10^{-4}	70	12.25×10^{-4}
50	11.41×10^{-4}	75	12.46×10^{-4}
55	11.62×10^{-4}	80	12.68×10^{-4}
60	11.80×10^{-4}	85	12.89×10^{-4}

表 7.4-18　导线电阻率

允许温度 θ_y/℃	导线电阻率 ρ/μΩ·m	允许温度 θ_y/℃	导线电阻率 ρ/μΩ·m
20	0.017 50	90	0.022 35
35	0.018 57	105	0.023 30
40	0.019 91	120	0.024 43

计算出的导线直径，应圆整成标准直径 d，然后再查出具有绝缘层的实际直径 d_1。

⑨ 计算线圈匝数及修正线圈尺寸　线圈的匝数取决于导线内的电流密度，可按式（7.4-29）计算。

$$N = \frac{4F_m}{J\pi d^2} \tag{7.4-29}$$

式中，N 为线圈匝数；J 为导线内的电流密度，对长时间工作的电磁铁，取2～4 A/mm²，对反复短时间工作的电磁铁，取4～10 A/mm²。

线圈匝数求出后，还要对原来算出的线圈厚度和高度加以修正。因为导线的实际截面为$\frac{\pi d_1^2}{4}$，所以整个线圈半个纵截面所占的面积

$$b'_k L'_k \approx N\frac{\pi d_1^2}{4}$$

式中，b'_k 为修正后的线圈厚度；L'_k 为修正后的线圈高度。因为所选电磁铁线圈结构因素 β 不变，所以可求得

$$b'_k \approx \sqrt{\frac{0.8Nd_1^2}{\beta}}$$

$$L'_k \approx \beta b'_k$$

⑩ 验算　线圈尺寸和匝数确定后，即可确定电磁铁的结构尺寸，绘出其结构图，然后对电磁铁的磁动势、磁感应强度、电磁铁的吸力进行验算。

（a）验算磁动势　由于线圈的平均匝长 $L_m = \pi D_m$，因此线圈内的总电阻为

$$R = 4\rho\frac{L_m}{\pi d^2}N$$

电磁铁中的实际磁动势为

$$F'_m = \frac{U}{R}N$$

（b）验算磁感应强度　根据算出的实际磁动势，算出气隙中的实际磁感应强度为

$$B'_0 = \frac{F'_m\mu(1-\alpha)}{2\delta}$$

若算出的 B'_0 与前面查出的 B_0 相差很大，则需重新计算，直至两者基本相符为止。

（c）验算电磁铁的吸力　对于Π型电磁铁，其实际计算吸力仍按吸力的基本公式（7.4-25）求出，但式中的 B_0 用 B'_0 代入，即

$$F'_0 = \frac{10^7}{4\pi}B'_0 S_0$$

若 $F'_0 \geqslant F_0$，则满足设计要求。

以上是对Π型电磁铁的设计计算。对于盘形电磁铁，可看成是由两个Π型电磁铁并联而成的（图7.4-42），因此基本上也按上述公式设计计算。

另外，若设计交流电磁铁，则因其磁场是交变的，所以电磁吸力应以平均值来考虑。对Π型电磁铁，吸力计算式为

[1] 根据电学和磁学法定计量单位（GB 3102.5—1993）的规定，线数匝数是量纲为1的量，所以磁动势的量纲为“安”而不是“安匝”。

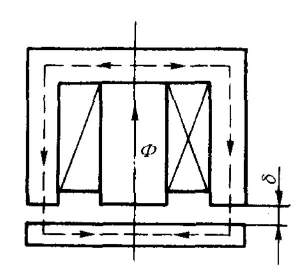


图 7.4-42　盘形电磁铁

$$F_0 = \frac{10^7}{8\pi} B_m^2 S_0$$

式中，F_0 为交流 Π 型电磁铁的吸力，N；S_0 为铁心截面积，m^2；B_m 为气隙中的最大磁感应强度，T。

线圈匝数计算式为

$$N = \frac{U}{4.44 f B_m S_0}$$

式中，f 为交流电源的频率，Hz。

励磁电流有效值计算式为

$$I = \frac{B_m \delta}{\sqrt{2} N \mu_0}$$

其他设计步骤，如线圈尺寸的确定等与前述基本相同，详见电磁铁设计的有关专著。

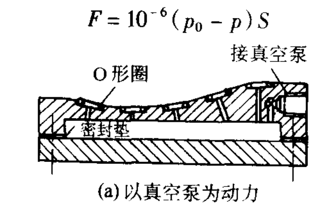
机床用的直流电磁铁，又称电磁吸盘，在我国许多机床附件厂都有定型产品，型号很多，主要有圆形和矩形两种结构形式，吸力多在 0.5 ~1.5 MPa之间。也有个别厂家还生产圆形和矩形的永磁吸盘，特殊形式的还可以订制，吸力在 0.6~1.8 MPa之间。机床上使用的电磁吸盘，也可用在焊接工装夹具的磁力夹紧机构上，例如，板材拼接用的电磁平台就是由电磁吸盘拼装而成的。

(2) 真空及电动夹紧机构

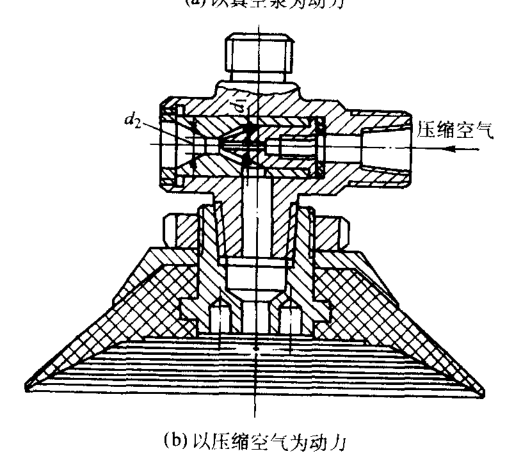
1) 真空夹紧机构　是利用真空泵或以压缩空气为动力的喷嘴所射出的高速气流，使夹具内腔形成真空，借助大气压力将焊件压紧的装置。它适用于夹紧特薄的或挠性的焊件，以及用其他方法夹紧容易引起变形或无法夹紧的焊件。在仪表、电器等小型器件的装焊作业中应用较多（图 7.4-43）。

真空夹紧机构的吸力计算式为

$$F = 10^{-6}(p_0 - p)S$$



(a) 以真空泵为动力



(b) 以压缩空气为动力

图 7.4-43　真空夹紧器

式中，F 为真空夹紧机构的吸力，N；p_0 为大气压强，Pa；p 为夹具内腔的真空度，Pa；S 为内腔的吸附面积，mm^2。

通常，按标准大气压计算时，$p_0 = 101\ 325$ Pa，若利用真空泵抽气形成真空（图 7.4-43a），一般夹具内腔的真空度可达 0.133 Pa，此时腔内压强可以忽略，即认为 $p = 0$。

设计真空夹紧机构时，要考虑突然断电导致夹具松夹带来的危险。如图 7.4-44 所示的真空泵抽气控制系统，就较好地解决了这一问题。当电磁换向阀 3 通电后，阀芯左移，真空泵与夹具内腔接通进行抽气，使腔内形成真空而吸附焊件；当电磁换向阀 3 断电而电磁换向阀 4 通电时，则 3 的阀芯复位 4 的阀芯左移，夹具内腔与大气接通，焊件松夹。若突然断电，则阀芯因弹簧作用而处在图示位置，将夹具内腔通道封死，如果夹具密封性好，就不会立即造成松夹事故。另外，为了使夹具内腔很快形成真空，可在系统内设一真空罐，夹具工作时，内腔中的空气迅速进入真空罐，然后由真空泵抽走。这样不仅提高了夹具的工作效率，而且也增加了工作过程的可靠性。

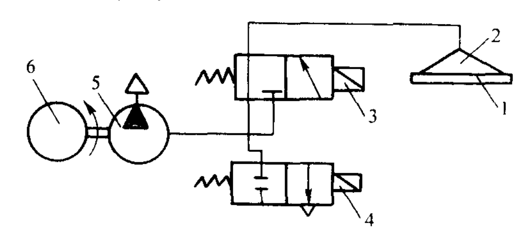


图 7.4-44　真空泵轴气控制系统

1—焊件；2—夹具内腔；3、4—电磁换向阀；5—真空泵；6—电动机

通过喷嘴喷射气流而形成真空的夹紧机构（图 7.4-43b），由于利用车间内的压缩空气为动力，省去了真空泵等设备，比较经济。但因其夹具内腔的吸力与气源的气压和流量有关，所以要求提供比较稳定的气源。另外，工作时会发出刺耳的噪声，不宜用在要求安静的场所。

设计这种喷嘴式真空夹紧机构时，要注意喷嘴的结构尺寸，其孔径、长度、锥角等对夹具工作的稳定性、吸力的大小和耗气量的多少都有直接影响。喷嘴通道长度不能过长，通道内壁表面粗糙度应控制在 $R_a3.2$ μm 以下，各通道截面的过渡处不能出现涡流，否则，气流速度会受到很大的阻碍。上述这些结构尺寸，往往通过实验最后确定。通常，喷嘴的尺寸 d_1（见图 7.4-43b）在 1~1.8 mm 之间选取，d_2 在 3~3.5 mm 之间选取。喷嘴常采用青铜制造。

2) 电动夹紧机构　电动夹紧机构是以电动机为动力源，经减速，再将回转运动变成直线运动对焊件进行夹紧的装置。其传动链长、体积大，在装焊作业中已很少应用（图 7.4-45）。

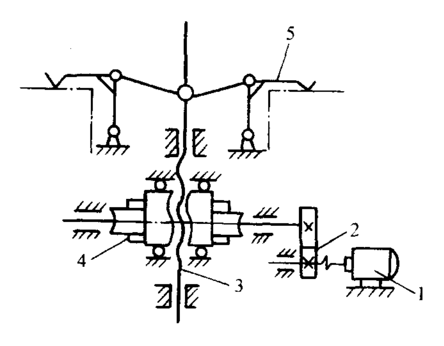


图 7.4-45　电动夹紧器

1—电动机；2—齿轮副；3—丝杆；4—蜗轮副；5—夹紧杠杆



2.8.4　组合夹具、琴键式夹具、专用夹具

（1）组合夹具

组合夹具是由一些规格化的夹具元件，按产品装焊要求所拼装成的可拆式夹具。

组成组合夹具的元件，品种繁多，规格多样，已形成标准系列，可按使用要求进行拼装。夹具使用完毕后，元件可完好地拆卸下来，经整理分类保管，以备下一次使用。

组合夹具适用于品种多、批量小、变化快、周期短的生产场合，特别是在新产品试制过程中，更为适用。但是与专用夹具相比，组合夹具体积庞大、质量较大，另外，夹具各元件之间都是用键、销、螺栓等零件连接起来的，连接环节多，手工作业量大，也不能承受锤击等过大的冲击载荷。

组合夹具按元件的连接形式不同，分为两大系统：一为槽系，即元件之间主要靠槽来定位用螺栓来连接；二为孔系，即元件之间主要靠孔来定位，用销来连接。每个系统又按需要分为大、中、小三个型别。我国已设计出此三个型别的槽系组合夹具，用于机械加工行业。详细内容，请参阅有关组合夹具的专著。

焊接生产中使用的组合夹具，多是由机械加工使用的组合夹具中退役下来的元件或低精度元件组合而成的。这是因为除了一些精密焊件外，多数焊件要求的装配精度和焊接精度均低于机械加工的精度，使用这些退役或低精度的元件，完全可以满足产品质量的要求，而且比较经济。

组合夹具的元件分为基础件、支撑件、定位件、导向件、压紧件、紧固件、合成件、辅助件等8个类别，其槽系组合夹具元件如图7.4-46所示；孔系组合夹具元件如图7.4-47所示。

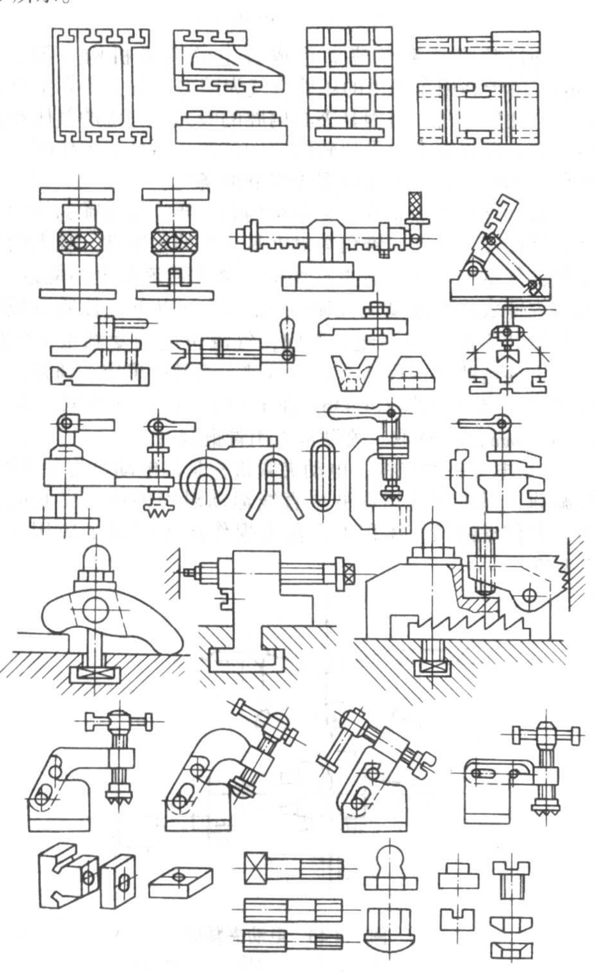


图7.4-46　槽系组合夹具元件

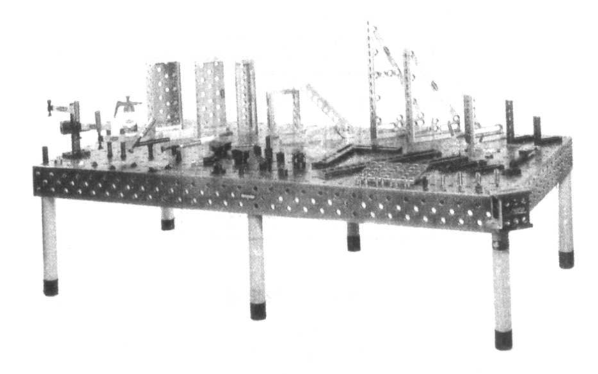


图7.4-47　孔系组合夹具元件

基础件是组合夹具中最大的元件，用做夹具的基础，通过它将其他元件连成一个整体，组成一套夹具。

支撑件是组合夹具的骨架元件，在夹具中起上下连接的作用，使合成件、定位件、导向件等元件可通过它与基础件连接在一起。各种支撑件还可用做不同形状和高度的支撑平面或定位平面，也可直接和焊件接触做定位件使用。在组装小型夹具时，也可做基础件使用。

定位件主要保证组合夹具各元件之间的定位精度和连接强度以及整个夹具的可靠性，同时也可用于焊件的正确安装与定位。

压紧件主要用来夹紧焊件，保证焊件定位后的位置不发生变化。

紧固件用来连接和紧固夹具中的各个元件，也用来紧固焊件。因为夹具中各元件紧固的牢固程度如何，会直接影响夹具本身的刚度和定位精度，所以在槽系夹具中采用的紧固（连接）螺栓多为细牙螺纹；在孔系夹具中采用的紧固（连接）销为特制的圆柱销（图7.4-48），其轴径统一，配合精度高，可防止使用过程中发生松动。

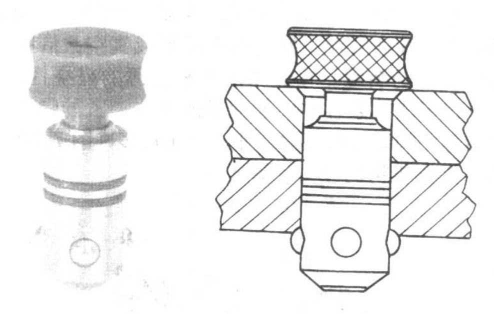


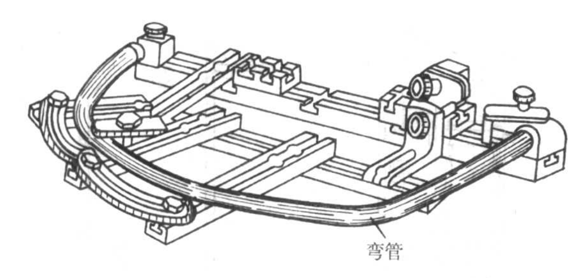
图7.4-48　孔系组合夹具的紧固（连接）销

导向件用于夹具元件相对位置变化时的导向，也可用于焊件变位时的导向。

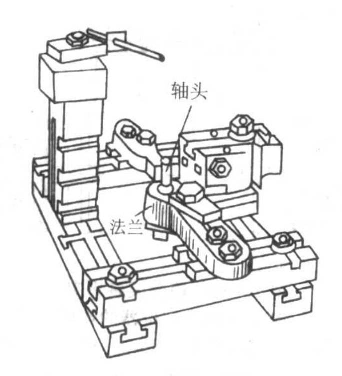
合成件是由若干零件装配成的有一定功能的部件，它在组合夹具中是整装整卸的，这样，可加快组装速度，简化夹具结构，同时也可扩大组合夹具的用途。合成件按用途分为支承合件、定位合件、调整合件、夹紧合件等。各种合件除具有其本身职能外，也作他用。

组合夹具的拼装和使用几乎都是手工作业，因此，它也是手动夹具的一种，其应用举例见图7.4-49所示，其中图7.4-49a是弯管对接用的槽系组合夹具，用它来保证弯管对接时的方位和空间几何形状；图7.4-49b是轴头与法兰对接用的槽系组合夹具，轴头与法兰的对中由夹具来保证。图7.4-49c是装配板焊结构的孔系组合夹具，其工作台（即夹具体）可视焊件大小和形状任意拼接。这种孔系夹具，国内已有商品销售。

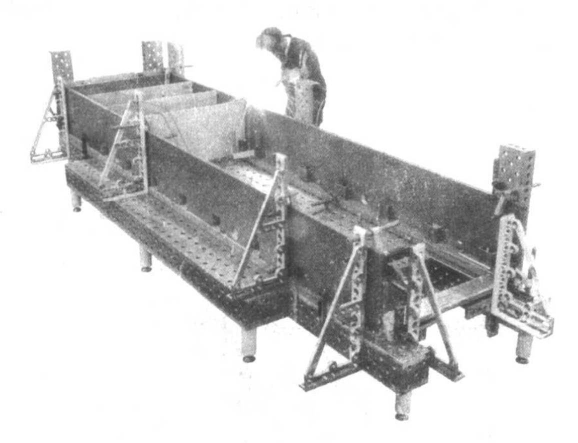
使用组合夹具时，为防止焊接飞溅对夹具表面的损伤，用前应涂防飞溅液。



(a) 弯管对接



(b) 轴头与法兰对接



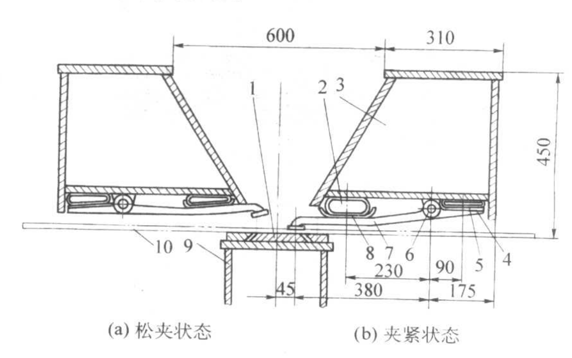
(c) 金属构件的装焊

图 7.4-49 组合夹具的应用

（2）琴键式夹具

在薄板对接和薄壁筒体的纵缝对接焊中，一般对接边很长，若沿边长整体夹紧，由于夹具制造误差和焊件厚度误差的影响，使对接边很难沿全长被压头压贴到焊接衬垫（多用紫铜或黄铜制作）上。若采用沿边长均匀布置几个夹紧点夹紧，则焊件易发生变形，更难沿全长压贴到焊接衬垫上，当夹紧力过大、过于集中时，还会损伤焊件的表面。若采用琴键式夹具（图 7.4-50、图 7.4-51、图 7.4-52），由于它是多个尺寸形状相一致的夹紧杠杆（压板）相互独立而紧密地沿对接边排成一列，类似琴键一样，利用夹紧气袋（图 7.4-50、图 7.4-52）或各自的小型或微型气缸（图 7.4-51）驱动，实施对焊件的夹紧，所以可使各夹紧杠杆（压板）的夹紧行程在相应的夹紧面上能很好地补偿夹具制造和焊件厚度带来的误差，使焊件沿对接边全长被压头柔性地压贴到焊接衬垫上，从而保证了薄形焊件的对接质量。

图 7.4-50 是拼接薄板用的琴键式夹具的剖面图。由图 7.4-50b 可知，当夹紧气袋充气、松夹气袋垫排气时，则夹紧杠杆绕铰接支座逆钟向转动将被焊薄板压贴到铜衬垫上，夹具处于夹紧状态。反之，如图 7.4-50a 所示，夹紧杠杆复位，夹具处于松夹状态。



(a) 松夹状态　(b) 夹紧状态

图 7.4-50 拼接薄板的琴键式夹具（剖面图）

1—铜衬垫；2—夹紧气袋；3—上支撑梁；4—松夹气袋垫；5—松夹气袋；6—铰接支座；7—夹紧杠杆；8—夹紧气袋垫；9—下支撑梁；10—被焊薄板

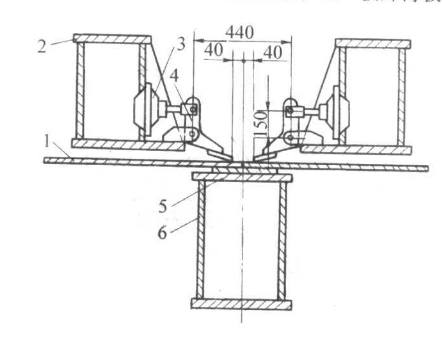


图 7.4-51 气缸作用的琴键式夹具（剖面图）

1—被焊薄板；2—上支承梁；3—薄膜式气缸；4—夹紧杠杆；5—铜衬垫；6—下支撑梁

夹紧气袋和松夹气袋的长度根据焊件的最大拼接长度而定；气袋的内径根据夹紧杠杆的压头行程和杠杆比而定（图 7.4-50）；整条气袋的出力根据气袋内径、长度和气体压强而定；夹紧杠杆的数量约等于其压头宽度除以夹具拼接长度所得的商。夹紧杠杆的夹紧力，可根据杠杆与夹紧气袋的接触面积、杠杆比、气体压强进行计算。由此还可算出沿压头宽度单位长度上的夹紧力，此力应与式（7.4-13）算出的夹紧力相一致。一般最大值约为 25 N/mm。

为了保证气袋的强度、气密性以及一定的柔韧性，通常用橡胶软管或类似消防水龙带的帆布软管来制作气袋。

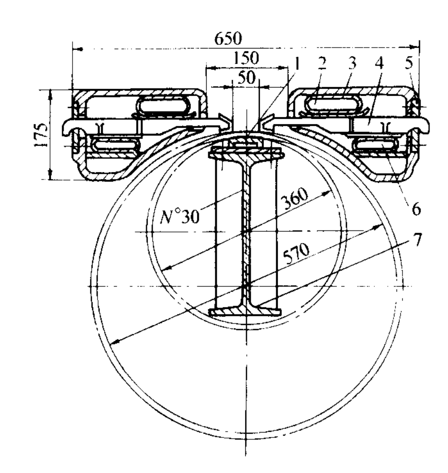
图 7.4-51 与图 7.4-50 的区别是：在图 7.4-51 中由单作用的薄膜式气缸 3（也可采用单作用或双作用的小型或微型气缸）驱动夹紧杠杆 4 夹紧被焊薄板 1，杠杆的复位是靠薄膜式气缸内部的压缩弹簧来完成的。

图 7.4-52 是筒体纵缝拼接用的琴键式夹具，其中图 7.4-52a 是用松夹气袋使琴键式压板复位；图 7.4-52b 是用拉伸弹簧使夹紧杠杆复位。

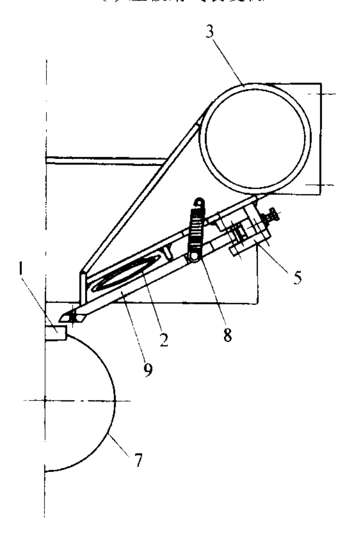
由以上三个图例看知，琴键式夹具属于气动夹具的派生品种，其夹紧机构多是杠杆式的。

国内一些焊接设备厂，将琴键式夹具与焊机合二而一，再配以焊枪行走、调节机构以及跟踪、电控等系统，组成“纵缝自动焊接机”进行生产销售。根据所焊材质的不同，其上所用琴键式夹具的气压为 0.5～8 MPa；适用焊件厚度在 0.2～8 mm 之间；拼接长度在 10～5 000 mm 之间，如有特殊要求，最长可达 8 000 mm；适用筒径范围随设备型号不同，在 75～750 mm 之间至 500～1 500 mm 之间不等。该机根据使用要求可配备不同的焊机，进行 TIG、MIG、MAG、PAW、LBW、CO_2、SAW 焊，实现钛、铝及其合金以及不锈钢、碳钢等材质的焊接。





(a) 压板用气袋复位



(b) 夹紧杠杆用拉簧复位

图 7.4-52 薄壁筒体纵缝拼接用的琴键式夹具（剖面图）
1—铜衬垫；2—夹紧气袋；3—上支撑梁；
4—琴键式压板；5—限位板；6—松夹气袋；
7—下支撑梁；8—拉伸弹簧；9—夹紧杠杆

(3) 专用夹具

专用夹具是在专用夹具体上，由多个不同定位器和夹紧机构组合成的具有专一用途的复杂夹具（图 7.4-7、图 7.4-38、图 7.4-53）。夹具所使用的动力，多是气动、气动（液压）加电磁、气动加真空、气动加手动等单一或混合式动力。夹具体的结构形式，定位器和夹紧机构的类型选择与布置，都是根据被装焊焊件的形状、尺寸、定位和夹紧要求，以及装配焊接工艺决定的。专用夹具除要满足工艺要求外，还应满足焊件的形位公差要求，同时要和生产率相匹配，还要特别注意满足焊枪的可焊达性和焊件的可装卸性能。

此外，在一些大型焊件的装焊作业中，为了简化和缩小专用夹具的结构，常采用依次分段的装焊工艺，这样，在夹具体上仅用一个移动式的夹紧机构，就可完成大型焊件的装焊任务。例如用于大型内燃机车顶盖侧沿的装配夹具，其装配胎模是一长约 20 m 的长方体框架式焊接结构，由于胎模很长，而且沿胎模的装配作业都是相同的，所以将夹紧机构设计成移动式的（图 7.4-54）。当安装着气动夹紧机构的台车在平行于胎模的轨道上移动时，便依次将铺设在胎模上的盖板、型钢式棚条等焊件压贴在胎模上，随之用手工 CO_2 气体保护焊进行定位焊接。这种设计，用一个移动式的夹紧机构，取代了沿胎模长度上布置的多个夹紧机构，使夹具结构大大简化，是一种经济实用的设计。

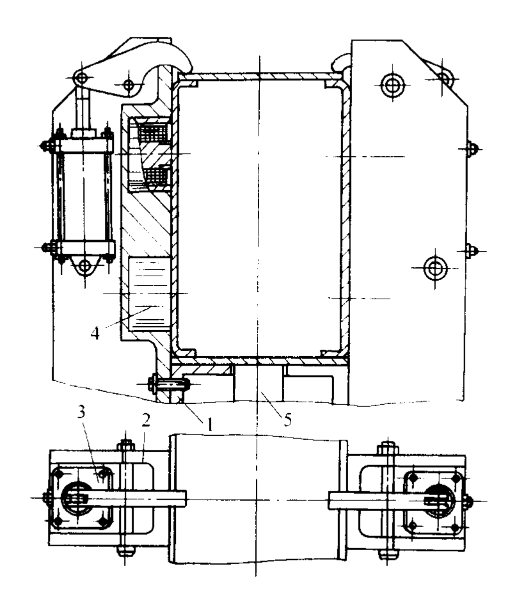


图 7.4-53 箱形梁装焊夹具
1—底座（起夹具体和定位器的作用）；2—立柱（起夹具体和定位器的作用）；3—液压夹紧机构；
4—电磁夹紧机构；5—顶出油缸

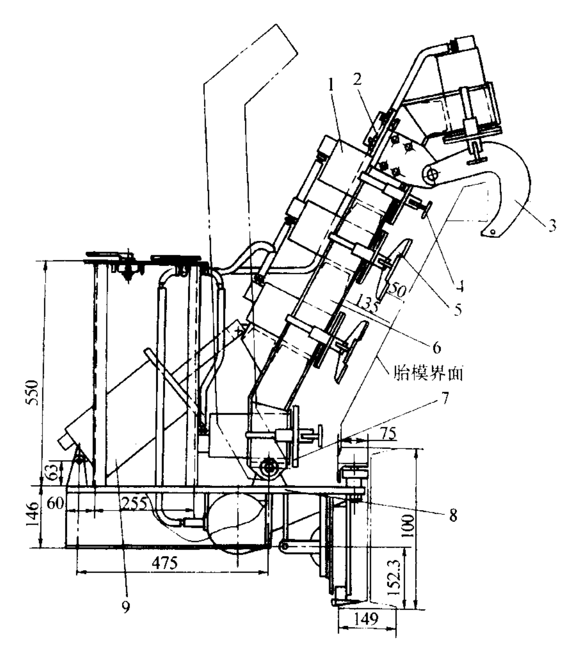


图 7.4-54 移动式气动夹紧机构
1—气缸总成Ⅰ；2—气缸总成Ⅱ；3—挂钩；
4—压头组成Ⅰ；5—压头组成Ⅱ；6—摇臂；
7—铰链支座；8—行走台车；9—气缸总成Ⅲ

3 焊接变位设备

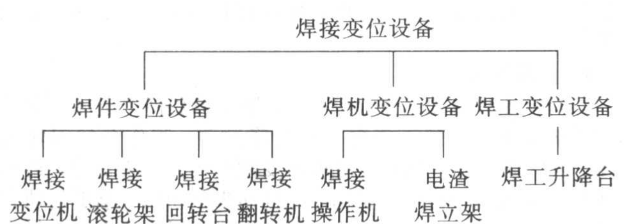
3.1 焊接变位设备的分类及其应具备的性能

焊接变位设备是改变焊件、焊机或焊工位置来完成机械化、自动化焊接的各种机械装备。

使用焊接变位设备可缩短焊接辅助时间，提高劳动生产率，减轻工人劳动强度，保证和改善焊接质量，并可充分发挥各种焊接方法的效能。



焊接变位设备的分类及各类所属设备如下。



各种焊接变位设备可单独使用，但多数场合是相互配合使用的。其中焊件、焊机（操作机）变位设备，已成为机械化、自动化装焊生产线的重要组成部分。在以焊接机器人为中心的柔性加工单元（FMC）和加工系统（FMS）中，焊件变位设备也是其组成之一。在复杂焊件和要求施焊位置精度较高的焊接作业中，也需要焊件变位设备的配合，才能完成其作业。

各种焊接变位设备不仅用于焊接作业，也用于装配、切割、检验、打磨、喷漆等作业。

一般焊接变位设备应具备的性能如下。

① 焊件、焊机变位设备要有较宽阔的调速范围，稳定的焊接运行速度，以及良好的结构刚度。

② 对尺寸和形状各异的焊件，要有一定的适用性。

③ 传动链中，应具有一级反行程自锁传动，以免动力源突然切断，因焊件重力作用而发生事故。

④ 与焊接机器人和精密焊接配合的焊件变位设备，其到位精度（点位控制）和运行轨迹精度（轨迹控制）应视焊件大小、工艺方法控制在 0.1 ~ 3 mm 之间，最高达到 0.01 mm。

⑤ 回程速度要快，但应避免产生冲击和振动。

⑥ 有良好的接电、接水、接气设施以及导热和通风性能。

⑦ 整个结构要有良好的密闭性，以免焊接飞溅物的损伤，对散落在其上的焊渣、药皮等脏物应易清除。

⑧ 焊接变位设备要有联动控制接口和相应的自保护性能，以便集中控制和相互协调动作。

⑨ 各种焊件变位设备的工作台面上，应刻有安装基线，并设有安装槽孔，能方便地安装各种定位器件和夹紧机构。

⑩ 兼作装配用的焊件变位设备，其工作台面要有较高的强度和抗冲击性能。

⑪ 用于电子束、等离子、激光、钎焊等焊接方法上的焊件变位设备，应满足导电、隔磁、绝缘等方面的特殊要求。

3.2 焊接变位机

3.2.1 功能及结构形式

焊接变位机是将焊件回转并倾斜，使焊件上的焊缝置于有利施焊位置的焊件变位设备。

焊接变位机主要用于机架、机座、法兰、封头等非长形焊件的翻转变位。

焊接变位机的基本结构形式有伸臂式、座式、双座式三种，其特点、性能、适用范围见表 7.4-19。

表 7.4-19 焊接变位机的特点、性能及适用范围

基本结构形式	结构特点与性能	适用范围
伸臂式（图 7.4-55）	回转工作台安装在伸臂的一端，伸臂相对于某一倾斜轴成角度回转，而此倾斜轴的位置多是固定的，但有的也可在小于 100°的范围内上下倾斜。也有的伸臂仅绕某一中心做圆弧运动 该机变位范围较大，作业适应性好，但整体稳定性差	电机驱动的，承载能力多在 0.5 t 以下，适用小型焊件的翻转变位 液压驱动的，承载能力多在 10 t 左右，适用于结构尺寸不是很大但自重较大的焊件 它们在手工焊中应用较多
座式（图 7.4-56）	工作台连同回转机构支撑在两边的倾斜轴上，工作台以焊速回转，倾斜轴通过扇形齿轮或液压缸，多在 110° ~ 140°的范围内恒速倾斜 该机稳定性好，一般不用固定在地面上，搬移方便	0.5 ~ 50 t 焊件的翻转变位。是目前产量最大、规格最全、应用最广的结构形式，常与伸缩臂式焊接操作机或弧焊机器人配合使用
双座式（图 7.4-57）	工作台座在"凵"形架上，以所需的焊速回转。"凵"形架座在两侧的机座上，多以恒速或所需焊速绕水平轴转动 该机不仅整体稳定性好，而且如果设计得当，焊件安放在工作台上后，倾斜运动的重心将通过或接近倾斜轴线，使倾斜驱动力矩大大减少，因此，重型变位机多采用这种结构	50 t 以上重型大尺寸焊件的翻转变位。多与大型门式焊接操作机或伸缩臂式焊接操作机配合使用

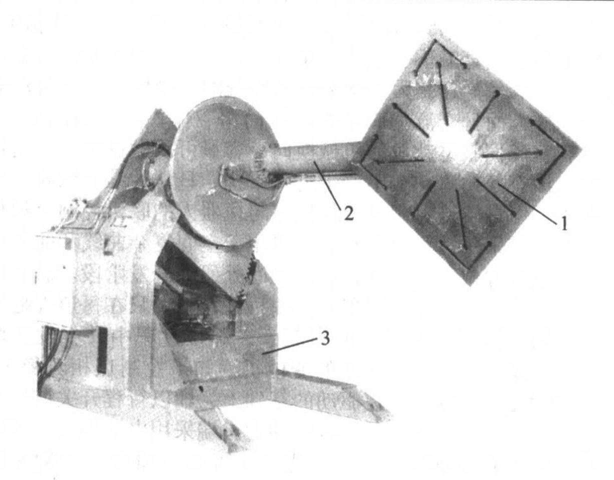


图 7.4-55 伸臂式焊接变位机

1—回转工作台；2—伸臂；3—机座

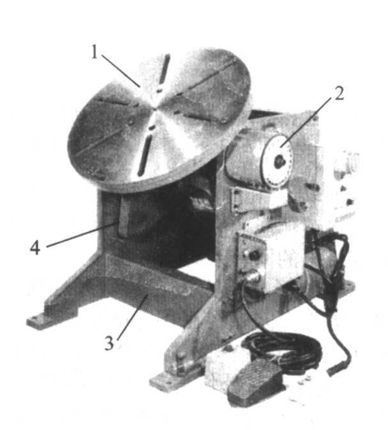


图 7.4-56 座式焊接变位机

1—回转工作台；2—倾斜角度指示盘；3—底座；4—扇形齿轮

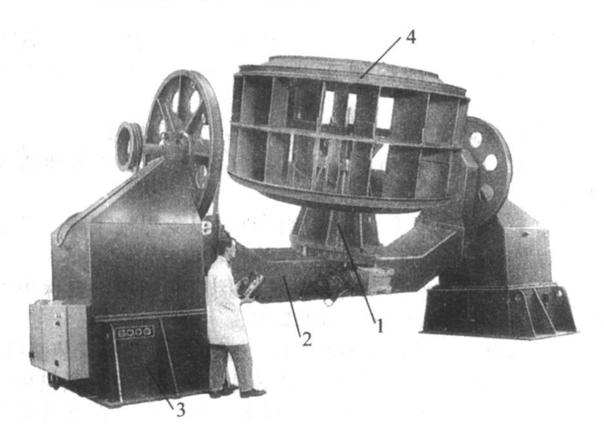


图 7.4-57 双座式焊接变位机

1—回转工作台；2—“U”形架；3—机座；4—焊件

焊接变位机的基本结构形式虽有上述三种，但其派生形式很多，有的变位机的工作台还具有升降功能，如图 7.4-58 所示。

3.2.2 驱动系统

焊接变位机的工作台应具有回转、倾斜两个运动，有的中型焊接变位机的工作台还有升降运动。工作台的回转运动，多采用直流电机和交流电机变频驱动，无级变速。近年出现的全液压变位机，是用液压马达来驱动的。倾斜运动有两种驱动方式。一种是电机通过扇形或圆形齿轮带动工作台倾斜（图 7.4-56、图 7.4-57），一种是采用液压油缸推动工作台倾斜（图 7.4-59），这两种方式都有应用，但在小型变位机中以前者为多。工作台的倾斜速度多是恒定的，但对应用在空间曲线焊接以及进行空间曲面堆焊的变位机，则是无级调速的。工作台的升降运动，几乎都采用液压驱动，通过柱塞式液压缸，使工作台升降。

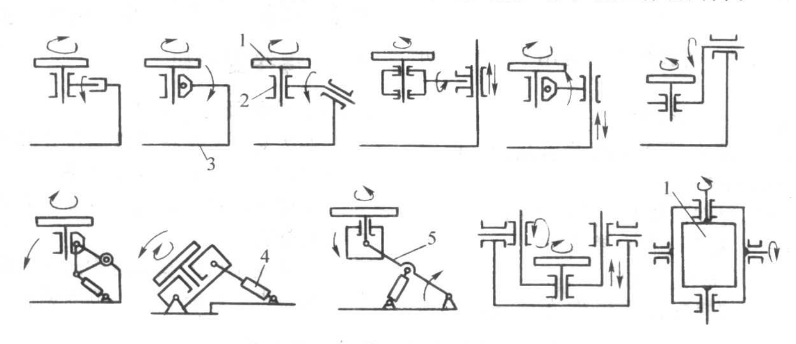


图 7.4-58 焊接变位机的派生形式

1—回转工作台；2—轴承；3—机座；4—推举液压缸；5—伸臂

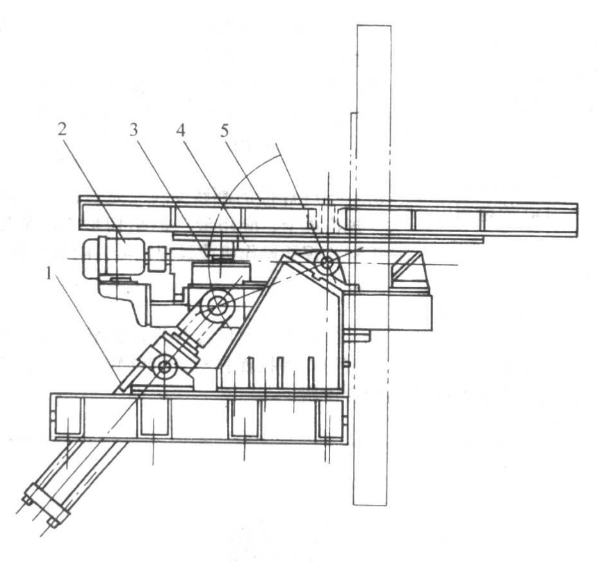


图 7.4-59 工作台倾斜采用液压缸推动的焊接变位机

1—液压缸；2—电动机；3—减速器；4—齿轮副；5—工作台

在工作台回转、倾斜传动系统中，常设有一级蜗杆传动，使其具有自锁功能。有的为了精确达位，还设有制动装置。在重型变位机的回转系统中，由于焊件偏心，工作台在回转过程中，重心形成的力矩在数值和性质上是周期变化的，为了避免因齿侧间隙存在在力矩性质改变时所产生的冲击，应在回转系统中设有抗齿隙机构，如双蜗轮传动机构或采用液压马上进行实时补偿等。在大型双座式焊接变位机中，常采用双扇形或双圆形齿轮倾斜机构，每个齿轮由各自的电动机单独驱动，在电动机之间设有转速联控装置。另外，在驱动系统的控制回路中还设有行程保护、过载保护、断电保护等装置以及工作台倾斜角度的指示等。

近几年，与焊接操作机配合使用的变位机，有的已开始采用交流伺服电动机驱动，像瑞典 ESAB 公司 1997 年出产的 100 t 双座式焊接变位机，其工作台的回转和倾斜运动，都是由两台 11 kW、190 N·m 的交流伺服电动机驱动的。其传动简图如图 7.4-60 所示。

工作台的回转运动应具有较宽阔的调速范围。我国生产的变位机一般为 1:33 左右，国外一般为 1:40，有的甚至高达 1:200。工作台回转时，速度应平稳均匀，在最大载荷下的速度波动不超过 5%，另外，工作台倾斜时，特别是向上倾斜时，运动应自如，即使在最大载荷下也不得产生抖动。

配合焊接机器人使用的焊接变位机、分同步协调运动的（即机器人与变位机同时动作完成焊件的焊接）和非同步协调运动的（即机器人施焊时，变位机不动作）两种，它们又分别称为轨迹控制和点位控制的变位机。这两种变位机，前者要求有很高的到位精度和轨迹精度以及速度平稳性精度。过去多采用直流伺服电动机驱动，现在几乎都被交流伺服电动机所取代。这是因为交流伺服系统的控制性能不仅与直流的一样，而且交流伺服电机结构简单、体积小、坚固耐用，没有直流伺服电动机的机械换向，容量可以做得很大，运行中也没有换向火花，不产生电磁干扰，日常的维护保养也较简单。但是轨迹控制的变位机在与机器人的联机控制上却很复杂，需采用计算机控制，主要用于空间复杂曲线和曲面近乎最佳施焊位置的焊接，在我国尚处研究开发阶段。后者仅要求到位精度，在与机器人的联机控制上，只在每道焊缝施焊初始与终了时才发生通讯联系，焊接过程中并不发生联系。因此，对于点位控制的变位机，如果控制点相对稳定，不经常变化，则在常规驱动的基础上，辅以行程开关或气动锥销强制分度定位，并在电机的输出端采用电磁制动，借助机电和可编程控制（PLC），就可实现到位精度和非同步协调运动的要求。这种变位机除可配合弧焊机器人使用外，更多场合是用在点焊机器人的 FMC 和 FMS 中。现在我国已有



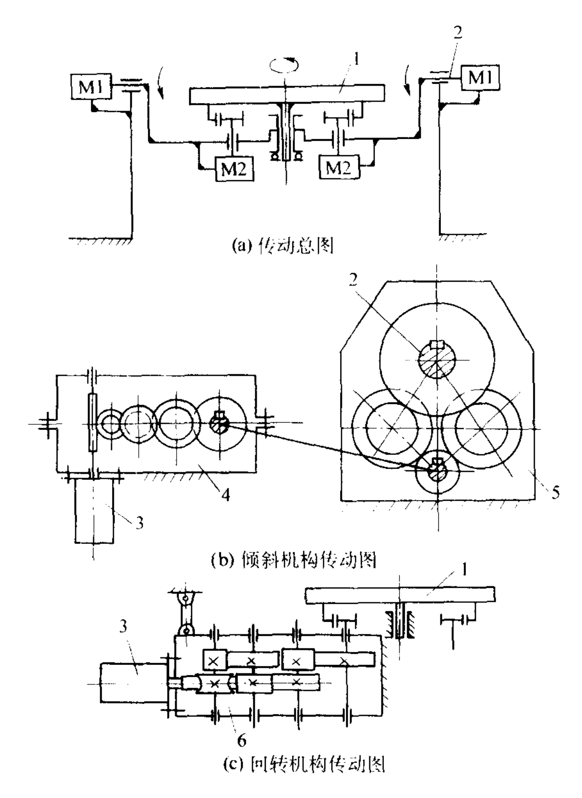


图 7.4-60　100 t 双座式数控焊接变位机传动简图

1—工作台；2—倾斜轴；3—交流伺服电动机；4—卧式倾斜减速器；5—立式倾斜减速器；6—卧式回转减速器；M_1—工作台倾斜驱动系统；M_2—工作台回转驱动系统

能力设计制造。

为了保证轨迹控制变位机的传动精度，在传动链中多采用谐波减速器、滚珠丝杠、精密齿轮副等传动元件。并在工作台回转轴和倾斜轴上接有编码器，进行闭环控制，在控制回路中还留有与机器人通讯的接口。

3.2.3　导电、导气装置

焊接变位机作为焊接电源二次回路的一个组成部分必须设有导电装置。目前，在焊接变位机上主要采用电刷式导电装置，它主要由电刷、电刷盒、刷架等组成，结构形式多样（图 7.4-61），其中图 7.4-61a 所示的导电装置是借用直流电动机上的换向装置，已标准化、系列化，在焊接变位机中应用最多。

导电装置的电阻不应超过 1 mΩ、容量应满足焊接额定电流的要求，其电刷的导电性能见表 7.4-20 所示。

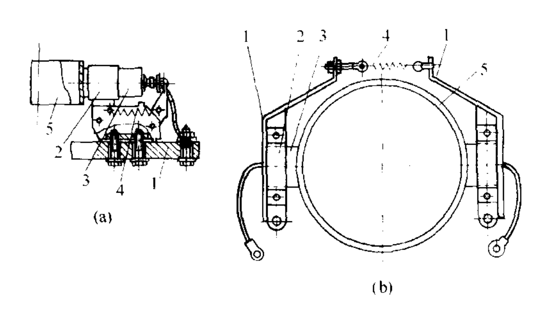
表 7.4-20　电刷导电性能

电刷种类	额定电流密度/A·cm⁻²
石　墨	10 ~ 11
软质电化石墨	12
硬质电化石墨	10 ~ 11
含铜石墨，铜约 91%	20
含铜石墨，铜约 52%	15

在焊接变位机的工作台上，如果要安装气动夹具，则必须设有导气装置，使进气接头既可随工作台回转，又能保证密封和气路的畅通，其典型结构见图 7.4-62。它一般都安装在工作台回转主轴的下端。

3.2.4　传动机构的设计计算

焊接变位机的结构形式不同，其传动机构的设计计算也有所不同。现以广泛使用的座式焊接变位机为例予以叙述。



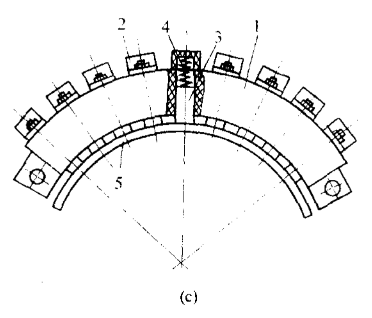


图 7.4-61　焊接变位机的导电装置

1—刷架；2—电刷盒；3—电刷；4—弹簧；5—导电环

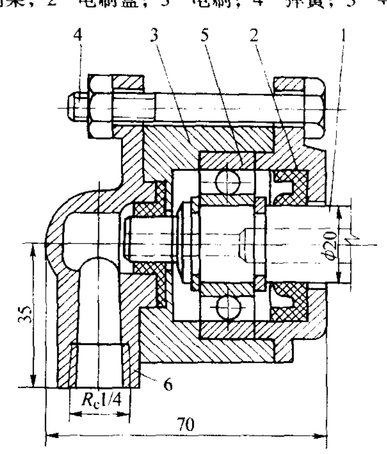


图 7.4-62　旋转式气路接头

1—回转轴；2—密封圈；3—接头壳体；4—螺栓；5—轴承；6—接口

1）回转轴强度计算　变位机回转轴的受力状态如图 7.4-63 所示，在焊件和夹具等重力作用下，回转轴的危险断面在轴承 A 处，A 点截面所受的弯曲力矩

$$M_w = G\sqrt{(h\sin\alpha)^2 + (e\cos\alpha)^2 + 2he\sin\alpha\cos\alpha\sin\beta}$$

式中，G 为综合质量；h 为重心距；e 为偏心距；β 为回转轴的转角；α 为回转轴的倾斜角

A 点截面的转矩

$$M_n = Ge\sin\alpha\cos\beta$$

按第三强度理论折算的当量弯矩

$$M_{xd} = \sqrt{M_w{}^2 + M_n{}^2} = G\sqrt{(e\cos\beta)^2 + (h\sin\alpha + e\cos\alpha\sin\beta)^2}$$

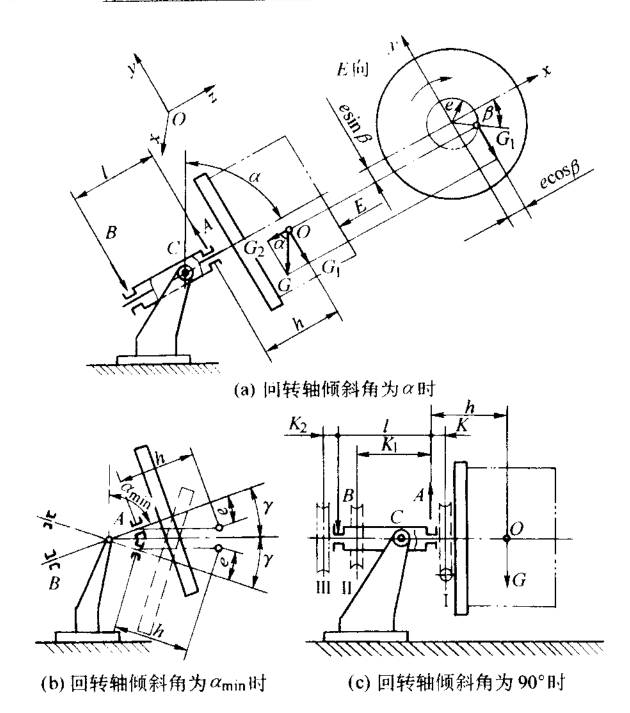
该式在满足 $\cot = \frac{e}{h}\sin\beta$ 时，才能出现最大值，其值

$$M_{xdmax} = G\sqrt{h^2 + e^2}$$

对于指定的变位机，$\frac{e}{h}$ 为已知，故出现 M_{xdmax} 时的 α 与 β 的关系曲线即可作出（图 7.4-64）。其中 α 最小、最大值（参阅图 7.4-63b）为

$$\alpha_{min} = \operatorname{arccot}\frac{e}{h} = 90° - \gamma \quad \alpha_{max} = \operatorname{arccot}\left(-\frac{e}{h}\right) = \alpha_{min} + 2\gamma$$





(a) 回转轴倾斜角为α时

(b) 回转轴倾斜角为α_{min}时　　(c) 回转轴倾斜角为90°时

图 7.4-63　焊接变位机受力状态

因此，回转轴的强度可选在 $\alpha_{min} \sim \alpha_{max}$ 即 2γ 范围内的任意位置进行计算。其直径

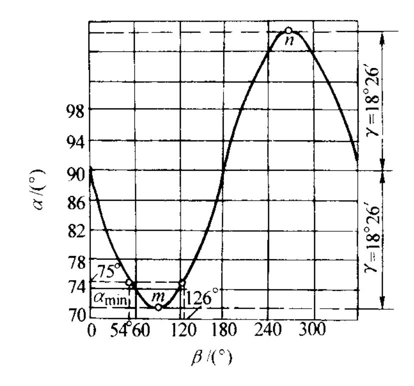


图 7.4-64　出现 M_{xdmax} 时的 α 与 β 的关系曲线（$e/h=0.33$）

$$d=\sqrt[3]{\frac{10G\sqrt{h^2+e^2}}{[\sigma]}}$$

式中，$[\sigma]$ 为许用应力，且 $[\sigma]=\varepsilon\sigma_{-1}/kn$，其中，比例因子 $\varepsilon=0.5$；应力集中系数 $k=1.5\sim2$；安全系数 $n=1.5\sim1.8$；对称循环疲劳极限 σ_{-1} 根据材料确定。

初算回转轴的轴径后，在此基础上确定轴各部分的结构尺寸，然后对其有关截面进行强度校核。在此校核中，所用到的支反力等有关数据按表 7.4-21 所提供的公式计算，并取大值。

表 7.4-21　回转轴支反力与力矩的计算公式

数据名称	符号	传动机构位置			
		Ⅰ　Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
		$\alpha=\alpha_{min}$　$\beta=90°$	$\alpha=90°$　$\beta=0°$		
A点支反力	F_{a1}	$G\frac{h^2+e^2+hl}{l\sqrt{h^2+e^2}}$	$G\frac{l+h}{l}$	$G\frac{l+h}{l}$	$G\frac{l+h}{l}$
	F_{a2}	0	$G\frac{e(l+K)}{lR}$	$G\frac{e(l-K_1)}{lR}$	$G\frac{eK_2}{lR}$
	F_a	$G\frac{h^2+e^2+hl}{l\sqrt{h^2+e^2}}$	$\frac{G}{l}\sqrt{(l+h)^2\frac{e^2}{R^2}(l+K)^2}$	$\frac{G}{l}\sqrt{(l+h)^2\frac{e^2}{R^2}(l-K_1)^2}$	$\frac{G}{l}\sqrt{(l+h)^2+\left(\frac{eK_2}{R}\right)^2}$
	F_{oc}	$G\frac{e}{\sqrt{h^2+e^2}}$	0	0	0
B支点反力	F_{b1}	$G\frac{\sqrt{h^2+e^2}}{2}$	$G\frac{h}{l}$	$G\frac{h}{l}$	$G\frac{h}{l}$
	F_{b2}	0	$G\frac{eK}{lR}$	$G\frac{eK_1}{lR}$	$G\frac{e(l+K_2)}{lR}$
	F_b	$G\frac{\sqrt{h^2+e^2}}{l}$	$\frac{G}{l}\sqrt{h^2+\left(\frac{eK}{R}\right)^2}$	$\frac{G}{l}\sqrt{h^2+\left(\frac{eK_1}{R}\right)^2}$	$\frac{G}{l}\sqrt{h^2+\frac{e^2}{R^2}(l+K_2)^2}$
A点截面上的力矩	M_x	$G\sqrt{h^2+e^2}$	Gh	Gh	Gh
	M_y	0	$G\frac{eK}{R}$	0	0
	M_n	0	0	Ge	Ge
	M_{xd}	$G\sqrt{h^2+e^2}$	$G\sqrt{h^2+\left(\frac{eK}{R}\right)^2}$	$G\sqrt{h^2+e^2}$	$G\sqrt{h^2+e^2}$

注：1. 表中各公式是按回转轴的主动齿轮或蜗杆布置在下方（图 7.4-63c）得出的。

2. 表中，R——回转轴从动齿轮或蜗轮的半径；F_{a1}，F_{b1}——A、B 截面上的垂直支反力；F_{a2}，F_{b2}——A、B 截面上的水平支反力；F_a，F_b——A、B 截面上的合成支反力；F_{oc}——回转轴轴向载荷；M_x，M_y——在 A 处绕 x、y 轴的弯矩；M_n——A 截面上的扭矩；M_{xd}——A 截面上的当量弯矩；其余符号见图 7.4-63。

回转轴的刚度校验取 $y \leqslant 0.000\,2L$，$\phi \leqslant 0.001L_n$，对装配用焊接变位机，取 $y \leqslant 0.000\,5L$，$\phi \leqslant 0.003L_n$。其中 y 为挠度，cm；L 为轴承之间的距离，cm；L_n 为回转轴受扭段的长度，cm；ϕ 为扭转角，(°)，且

$$\phi = 180M_{nmax}L_n/(\pi G_1 J)$$

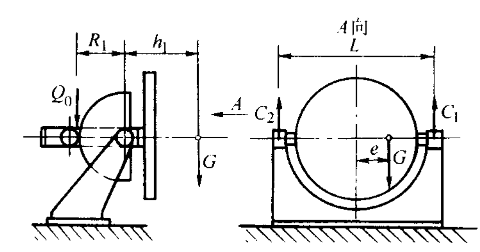
式中，钢的切变模量 $G_1 = 80$ GPa；J 为轴截面惯性矩，cm^4；M_{nmax} 为回转轴的最大转矩，N·cm。

2）回转轴驱动功率计算　在 $\alpha = 90°$，$\beta = 0°$时，回转轴的扭矩出现最大值 $M_{nmax} = Ge$，以此计算驱动功率 N（kW）

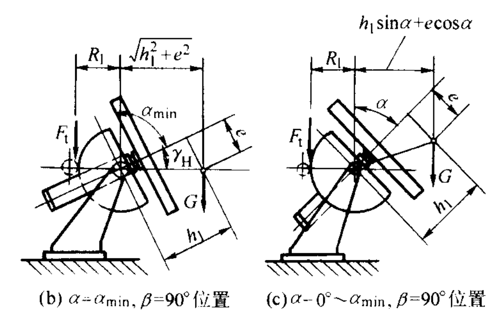
$$N = \frac{(Ge + M_f)n}{9\,550\eta}$$

式中，n 为回转轴的最大转速，r/min；η 为回转系统的传动效率；M_f 为轴承处的摩擦力矩，N·m。且 $M_f = 0.5f\,(F_a d_a + F_b d_b)$，其中，$f$ 为轴承的摩擦因数；d_a、d_b 为 A、B 处的轴径（图 7.4-63a）；F_a、F_b 为 $\alpha = 90°$、$\beta = 0°$时的 A、B 处的合成支反力，按表 7.4-21 中的公式计算。

3）倾斜机构设计计算　倾斜机构的受力状态见图 7.4-65，计算时应考虑 $\alpha = 90°$（图 7.4-65a），$\alpha = \alpha_{min}$（图 7.4-65b）两个位置。



(a) α=90°、β=0°位置



(b) $\alpha=\alpha_{min}$, β=90°位置　(c) α=0°～α_{min}, β=90°位置

图 7.4-65　变位机倾斜机构受力状态

在 $\alpha = \alpha_{min}$、$\beta = 90°$时出现最大倾斜力矩值

$$M_{T\max} = G\sqrt{h_1^{\ 2} + e^2}$$

以此计算倾斜轴的驱动功率（计算公式与回转轴的相同）和扇形齿上的圆周力。

作用在倾斜轴轴径 c_1 和 c_2 上的支反力，以回转轴在图 7.4-65b 倾斜位置时最大，但在 $\alpha = 90°$、$\beta = 0°$即图 7.4-65a 位置时，焊件偏心，两轴颈载荷不等，也可能出现最大值，因此两位置均予计算，取其大值。

倾斜机构的计算公式见表 7.4-22。

当扇形齿轮固定在回转机构的箱体上时，倾斜轴在其轴颈处仅受支反力和弯曲力矩。其中轴颈工作部分的弯曲力矩

$$M_w \approx 0.5F_{c1}L_1$$

式中，F_{c1} 由表 7.4-22 中的公式计算；L_1 为与轴承接触部分的长度。

倾斜轴的轴径

$$d = \sqrt[3]{\frac{10M_w}{[\sigma]}}$$

表 7.4-22　倾斜机构计算公式

位置		$\alpha = 90°$，$\beta = 0°$	$\alpha = \alpha_{min}$，$\beta = 90°$
滚动轴承	M_T	Gh_1	$G\sqrt{h_1^2 + e^2}$
	F_{c1}	$\frac{G}{R_1L}(R_1 + h_1)(0.5L + e)$	$C_1 = C_2 = \frac{G}{2R_1} \times (R_1 + \sqrt{h_1^2 + e^2})$
	F_{c2}	$\frac{G}{R_1L}(R_1 + h_1)(0.5L - e)$	
	F_0	$\frac{G}{R_1}(R_1 + h_1)$	$\frac{G}{R_1}(R_1 + \sqrt{h_1^2 + e^2})$
	F_t	$\frac{Gh_1}{R_1}$	$\frac{G\sqrt{h_1^2 + e^2}}{R_1}$
滑动轴承	M_T	Gh_1	$G\sqrt{h_1^2 + e^2}$
	K_f	$1 + 0.5f \times \frac{d}{2R_1 - fd}$	$1 + 0.5f \times \frac{d}{2R_1 - fd}$
	F_{c1}	$\frac{G}{R_1L}(R_1 + h_1)(0.5L + e)K_f$	$C_1 = C_2 = \frac{G}{2R_1} \times (R_1 + \sqrt{h_1^2 + e^2})K_f$
	F_{c2}	$\frac{G}{R_1L}(R_1 + h_1)(0.5L - e)K_f$	
	F_0	$\frac{G}{R_1}(R_1 + h_1)K_f$	$\frac{G}{R_1}(R_1 + \sqrt{h_1^2 + e^2})K_f$
	M_f	$0.5F_0fd$	$0.5F_0fd$
	F_t	$\frac{M_T + M_f}{R_1}$	$\frac{M_T + M_f}{R_1}$

注：1. 表中公式是按与扇形齿轮啮合的主动齿轮的轴线以及倾斜轴的轴线在同一水平面内，并且扇形齿轮及 G 的作用线在同一垂直倾斜轴的平面内推导出的（图 7.4-65a）。
2. 滚动轴承内的摩擦力忽略不计。
3. 表中，M_T—倾斜力矩；F_{c1}、F_{c2}—倾斜轴上 c_1、c_2 处的支反力；F_0—F_{c1}与 F_{c2}之和；F_t—扇形齿轮上的圆周力；M_f—轴承内的摩擦阻力矩；d—倾斜轴轴颈处的直径；K_f—滑动轴承当量摩擦因数；f—滑动摩擦因数；其余符号见图 7.4-65。

通常，倾斜轴的结构是由回转机构的箱体在其两侧焊接上转轴组成的，除两侧轴颈部分外，基本上是一箱形梁。该梁在两个对称布置的扇形齿轮带动下使工作台做倾斜运动时，受有弯矩和扭矩。其弯曲应力

$$\sigma_w \approx \frac{GL}{4w}$$

式中，L 为倾斜轴上两轴承的间距；w 为箱形梁截面系数。扭应力

$$\tau = \frac{G\sqrt{h_1^{\ 2} + e^2}}{4St}$$

式中，S 为箱形梁截面板厚中线围成的面积；t 为箱形梁截面板厚。

合成应力

$$\sigma = \sqrt{\sigma_w^{\ 2} + 3\tau^2} = \frac{G}{4}\sqrt{\frac{L^2}{w^2} + 3\frac{h_1^{\ 2} + e^2}{S^2t^2}}$$

倾斜轴的刚度校验取 $y \leqslant 0.000\,2L$、$\Phi \leqslant 0.000\,5L$，对装配用的焊接变位机取 $y \leqslant 0.000\,5L$、$\Phi \leqslant 0.001\,5L$。L 的单位 cm。

3.2.5　许用载重量的确定

焊接变位机的额定载重量是指回转轴倾斜角在 α_{min} ~ α_{max} 范围内以及 h 和 e 为额定值时的许用载重量，若在 0° ~ α_{min} 范围内使用变位机（图 7.4-65c）时，则许用载重量还可以大于额定载重量。此许用值通过计算可以求出，但很烦



项，一般是从事先做好的许用载重图上查得（图 7.4-66）。

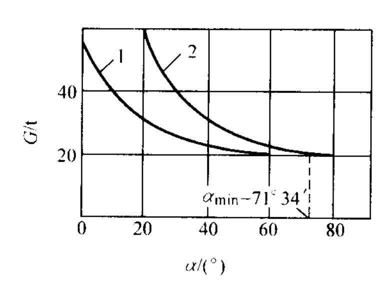


图 7.4-66　变位机许用载重量

（额定载重量 20 t，$h=1$ m，$e=0.33$ m）

1—按机械强度计算；2—按回转功率计算

另外，即使在 $\alpha_{min}\sim\alpha_{max}$ 范围内，由于焊件结构尺寸的不同带来 e、h 值的变化，使许用载重量也发生改变。在使用时，应根据 e、h 值按载重图（图 7.4-67）确定许用值。

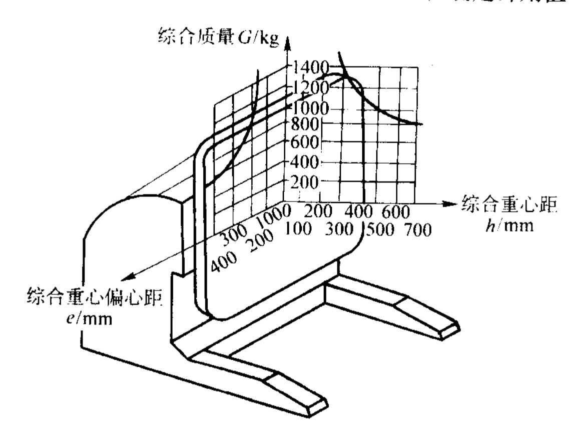


图 7.4-67　焊接变位机载重图举例

3.2.6　焊接变位机的生产情况及标准化、系列化

在工业发达国家，焊接变位机已标准化、系列化，并由专门厂家生产，品种规格齐全，技术指标先进，不仅有各种结构形式的普通焊接变位机，还有配合焊接机器人使用的高精度变位机。这些厂家比较有名的有：瑞典的 ESAB、意大利的 ANSALDO、德国的 CLOOS、奥地利的 IGM、美国的 LINCOLN 等公司以及日本的マツモト机械株式会社等。他们的产品，我国都有引进，其中以引进 ESAB 公司的较多，兰州石油化工机械厂早在 1991 年就引进了该公司出产的 30 t 焊接变位机；东方锅炉厂为了核电站反应容器的生产，1997 年也从该公司引进了 100 t 的焊接变位机。

配合焊接机器人使用的焊接变位机，在我国几乎都是作为焊接柔性加工单元（FMC）和柔性加工系统（FMS）的组成部分--并引进的，主要用于汽车、工程机械等有关结构的焊接。

我国自“七五”以来，已有专业厂家开始生产焊接变位机，载重量在 0.5 ~ 100 t 之间，大部分是座式的。沈阳电工机械厂生产的 1.5 ~ 25 t 座式焊接变位机，不仅用于焊件的一般焊接，而且也用于封头内表面的带极堆焊，性能不错。到 20 世纪初，焊接变位的生产厂家已达 21 家，可生产多种结构形式的焊接变位机。但从整体看，无论品种规格还是性能质量与发达国家存在着差距。特别是大吨位的焊接变位机性能，在速度平稳性、变位精度、驱动功率指标、与焊接操作机联机动作等方面，存在着较大的差距。即便如此，国产焊接变位机，特别是中小型焊接变位机，还是能满足一般焊件施焊要求的。

我国已制定了焊接变位机的行业标准（JB/T 8833—2001）。文中规定，变位机的回转机构应实现无级调速并可逆转，承受最大载荷时的速度波动不超过 5%，倾斜驱动应平稳，在最大负荷下不得倾覆。当最大负荷超过 25 kg 时，其倾斜机构应采用机动并有自锁性能。在变位机上应设有导电装置，其容量应满足额定电流的要求等。文中还规定了焊接变位机的主要技术参数，见表 7.4-23，读者在设计焊接变位机时，应予遵照。

表 7.4-23　焊接变位机技术参数

（摘自 JB/T 8833—2001）

<table>
<tr><th>参数
型号</th><th>最大负荷 Q/kg</th><th>偏心距 A/mm ≥</th><th>重心距 B/mm ≥</th><th>台面高度/mm ≤</th><th>回转速度 n₁ /r·min⁻¹</th><th>焊接额定电流 /A</th><th>倾斜角度 α/（°）≥</th></tr>
<tr><td>HB25</td><td>25</td><td>40</td><td>63</td><td rowspan="3">—</td><td>0.5 ~ 16.0</td><td>315</td><td rowspan="12">135</td></tr>
<tr><td>HB50</td><td>50</td><td>50</td><td>80</td><td>0.25 ~ 8.0</td><td rowspan="2">500</td></tr>
<tr><td>HB100</td><td>100</td><td>63</td><td>100</td><td>0.10 ~ 3.15</td></tr>
<tr><td>HB250</td><td>250</td><td rowspan="2">160</td><td rowspan="9">400</td><td rowspan="2">1 000</td><td rowspan="3">0.05 ~ 1.6</td><td>630</td></tr>
<tr><td>HB500</td><td>500</td><td rowspan="2">1 000</td></tr>
<tr><td>HB1000</td><td>1 000</td><td rowspan="5">250</td><td rowspan="2">1 250</td></tr>
<tr><td>HB2000</td><td>2 000</td><td rowspan="3">0.03 ~ 1.0</td><td rowspan="4">1 250</td></tr>
<tr><td>HB3150</td><td>3 150</td><td rowspan="4">1 600</td></tr>
<tr><td>HB4000</td><td>4 000</td></tr>
<tr><td>HB5000</td><td>5 000</td><td rowspan="3">0.025 ~ 0.80</td></tr>
<tr><td>HB8000</td><td>8 000</td><td rowspan="5">200</td><td rowspan="3">1 600</td></tr>
<tr><td>HB10000</td><td>10 000</td><td rowspan="2">2 000</td></tr>
<tr><td>HB16000</td><td>16 000</td><td>500</td><td rowspan="3">0.016 ~ 0.50</td><td rowspan="3">120</td></tr>
<tr><td>HB20000</td><td>20 000</td><td>630</td><td rowspan="2">2 500</td><td rowspan="5">2 000</td></tr>
<tr><td>HB31500</td><td>31 500</td><td rowspan="2">800</td></tr>
<tr><td>HB40000</td><td>40 000</td><td rowspan="3">160</td><td rowspan="3">3 150</td><td rowspan="3">0.010 ~ 0.315</td><td rowspan="3">105</td></tr>
<tr><td>HB50000</td><td>50 000</td><td rowspan="2">1000</td></tr>
<tr><td>HB63000</td><td>63 000</td></tr>
</table>

从使用的经济性、时效性出发，通常，只有在市售焊接变位机不能满足产品制造工艺要求的前提下，用户才自行设计制造。若能满足要求，还是要以选用为主，特别是要首选国产焊接变位机，但在选用时，应注意以下几点。

1）焊件的质量、焊件在工作台上的重心距、偏心距应在变位机载重图或承载表的数据范围内，并有一定的裕量。

2）若变位机用来焊接环焊缝时，应根据焊件坡口的回转半径和焊接速度换算出工作台的回转速度，该速度应在变位机转速的调节范围之内。另外，要注意工作台的运转平稳性是否满足施焊工艺的要求。

3）若焊件外廓尺寸很大，则需要考虑工作台倾斜时，倾斜角度是否满足焊件在最佳施焊位置的要求；在此倾斜角下是否会发生焊件与地面的接触，若会发生，则除选用工作台离地间隙更大的变位机外，也可采用增加基础高度或设置地坑的办法来解决。

4）变位机上若需要安装气动、电磁夹具以及水冷设施时，应向商家相应地提出接气、接电、接水装置的要求。

5）变位机的许用焊接电流应大于焊件施焊工艺所要求的最大焊接电流。

6）是否需要与焊接操作机或焊接机器人的通讯接口。



3.3　焊接滚轮架

3.3.1　功能及结构形式

焊接滚轮架是借助主动滚轮与焊件之间的摩擦力带动焊件旋转的焊件变位设备。

焊接滚轮架主要用于筒形焊件的装配与焊接，但是若对主、从动滚轮的高度作适当的调整后也可进行锥体、分段不等径回转体的装配与焊接。对于一些非圆长形焊件，若将其装卡在特制的环行卡箍内，也可在焊接滚轮架上进行装焊作业。

焊接滚轮架按结构形式分为两类。

第一类是长轴式焊接滚轮架，其轴向一排为主动滚轮，另一排为从动滚轮（图 7.4-68）。也有两排均为主动轮的，主要用于细长薄形焊件的组对与焊接。

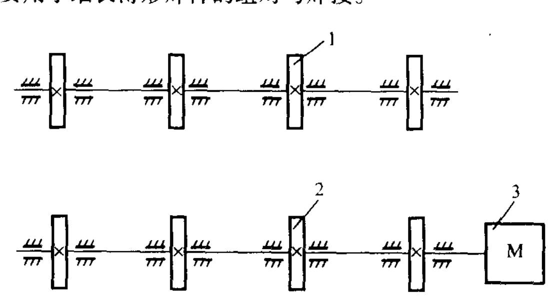


图 7.4-68　长轴式焊接滚轮架

1—从动滚轮；2—主动滚轮；3—驱动装置

有的长轴式滚轮架为一长形滚柱，直径 0.3～0.4 m，长度 1～5 m。筒体置于其上不易变形，适用于薄壁、小直径、多筒节的组对与焊接（图 7.4-69）。

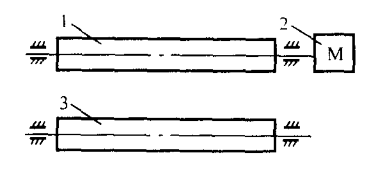


图 7.4-69　滚柱式滚轮架

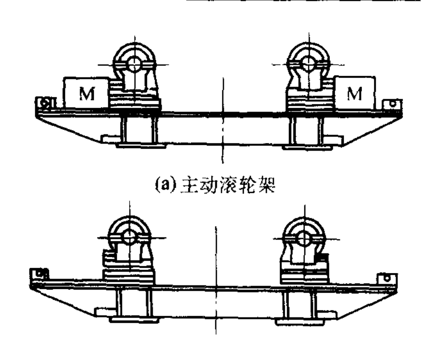
1—主动滚柱；2—驱动装置；3—从动滚柱

长轴式滚轮架，一般是用户根据焊件结构特点，自行设计制造的，市场可供选用的定型产品很少。

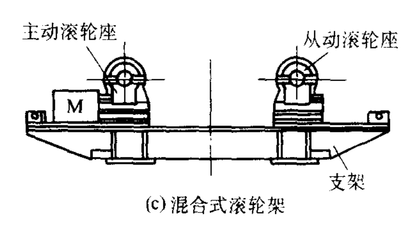
第二类是组合式焊接滚轮架。其主动滚轮架、从动滚轮架和混合式滚轮架（即在一个支架上有一个主动轮座和一个从动轮座）都是独立的（图 7.4-70），它们之间根据焊件质量和长度任意组合，其组合比例也不仅是 1:1 的组合，因此使用方便灵活，对焊件的适应性强，是当今应用最广泛的结构形式。国内外厂家，均有各自的系列产品供应市场。

当装焊壁厚较小而长度很长的筒形焊件时，宜用几台混合式滚轮架的组合，这样沿筒体长度方向均有主动轮驱动，使焊件不致打滑和扭曲。当装焊壁厚较大、刚性较好的筒形焊件时，常采用主动滚轮架和从动滚轮架的组合。这样，即使主动轮架在筒体一端驱动焊件旋转，但因焊件刚性较好，仍能保证转速的均匀，也不致发生扭曲变形。

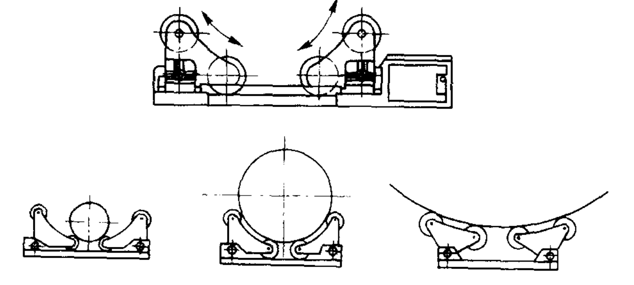
为了焊接不同直径的焊件，焊接滚轮架的滚轮间距应能调节。其调节方式有两种，一种是自调式的，一种是非自调式的。自调式的可根据焊件直径自动调整滚轮的间距（图 7.4-71～图 7.4-75），非自调式的是在支架上移动滚轮座来调节滚轮的间距（图 7.4-72）。也可将从动轮座设计成图 7.4-73 所示的结构形式，以达到调节便捷的目的，但调节范围有限。对重型滚轮架，多采用车间起重设备挪动滚轮座，进行分段调节。对轻型滚轮架，多采用手动或电动丝杠螺母机构来移动滚轮座，进行连续调节（图 7.4-74）。



(a) 主动滚轮架



(b) 从动滚轮架



(c) 混合式滚轮架

图 7.4-70　组合式焊接滚轮架

图 7.4-71　自调式焊接滚轮架

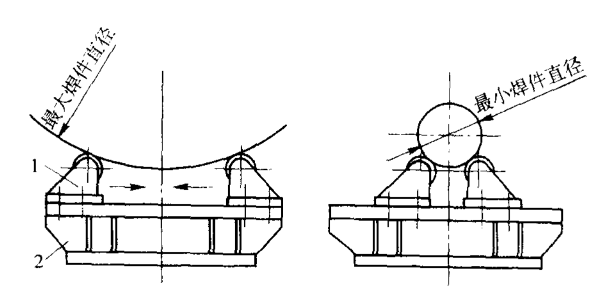


图 7.4-72　非自调式焊接滚轮架

1—滚轮座；2—支架

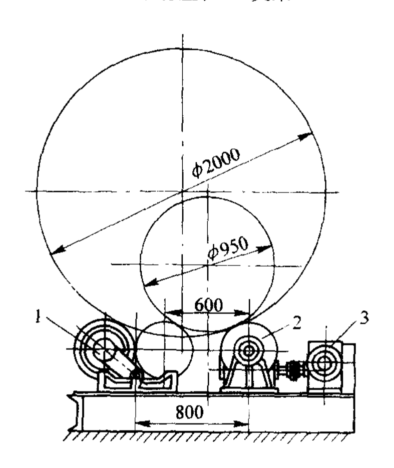


图 7.4-73　从动轮可调节的焊接滚轮架

1—从动轮座；2—主动轮座；3—驱动装置

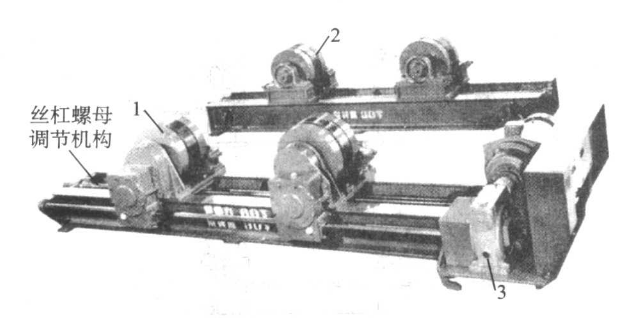


图 7.4-74 滚轮座可连续调节的焊接滚轮架

1—主动轮座；2—从动轮座；3—驱动装置

为了便于调节滚轮架之间的距离，以适应不同长度焊件的装焊需要，有的滚轮架上还安有机动或非机动的行走机构（图 7.4-75），使其沿轨道移行，调节相互的距离。

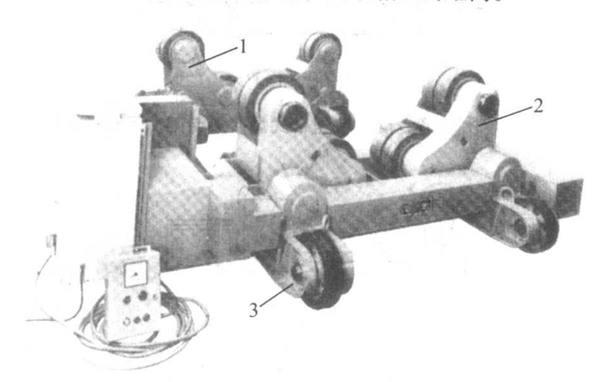


图 7.4-75 带有行走机构的焊接滚轮架

1—从动滚轮架；2—主动滚轮架；3—行走机构

焊接滚轮架的滚轮结构主要有四种类型，其特点和使用范围见表 7.4-24 所示。

表 7.4-24 滚轮结构的特点和适用范围

类型	特　　点	适用范围
钢轮	承载能力强，制造简单	一般用于重型焊件和需预热处理的焊件以及额定载重量大于 60 t 的滚轮架
胶轮	钢轮外包橡胶、摩擦力大、传动平稳但橡胶易压坏	一般多用于 10 t 以下的焊件和有色金属容器
组合轮	钢轮与橡胶轮相结合，承载能力比橡胶轮高，传动平稳	一般多用于 10～60 t 的焊件
履带轮	大面积履带和焊件接触，有利于防止薄壁工件的变形，传动平稳但结构较复杂	用于轻型、薄壁大直径的焊件及有色金属容器

3.3.2 焊接滚轮架的计算

1）驱动功率计算　根据单边驱动的滚轮受力状态（图 7.4-76），可按下式计算主动滚轮上的驱动圆周力 F_1，从动滚轮的转动阻力 F_2，主、从滚动轮上的支反力 F_{f1} 和 F_{f2}。

$$F_1 = G\left(\varepsilon + \frac{\varepsilon + \sin\dfrac{\alpha}{2}}{b\sin\alpha + \cos\alpha - 1}\right)$$

$$F_2 = G\frac{\varepsilon + \sin\dfrac{\alpha}{2}}{b\sin\alpha + \cos\alpha - 1}$$

$$F_{f1} = \frac{G}{2\cos\dfrac{\alpha}{2}}\left(1 - \frac{\varepsilon\cos\alpha}{\sin\dfrac{\alpha}{2}} + \frac{\varepsilon + \sin\dfrac{\alpha}{2}}{b\cos\dfrac{\alpha}{2} - \sin\dfrac{\alpha}{2}}\right)$$

$$F_{f2} = \frac{G}{2\cos\dfrac{\alpha}{2}}\left(1 + \frac{\varepsilon}{\sin\dfrac{\alpha}{2}} + \frac{\varepsilon + \sin\dfrac{\alpha}{2}}{b\cos\dfrac{\alpha}{2} - \sin\dfrac{\alpha}{2}}\right)$$

式中，G 为焊件质量；$\varepsilon = e/R$，且 e 为偏心距，R 为焊件半径；α 为中心角；$b = \dfrac{G_r}{fd_r + 2\mu}$，且 D_r 为滚轮直径，f 为滚轮轴承摩擦因数，对滑动轴承 $f = 0.1$，对圆锥滚子轴承 $f = 0.02$，d_r 为滚轮轴径，μ 为滚动摩擦因数，对钢轮，$\mu = 0.06 \sim 0.08$ cm，对橡胶轮 $\mu = 0.25 \sim 0.35$cm。

作用在每个主、从动轮上的载荷分别为

$$P_1 = \frac{\sqrt{F_{f1}^2 + F_1^2}}{i_r}k_r$$

$$P_2 = \frac{\sqrt{F_{f2}^2 + F_2^2}}{i_r}k_r$$

式中，i_r 为在一侧的滚轮数；k_r 为载荷不均匀系数。当 $i_r = 2$时，$k_r = 1$；当 $i_r \geqslant 3$ 时，$k_r = 1.2 \sim 1.3$。

主动滚轮所受总转矩按下式计算

$$M_n = F_1\frac{D_r}{2} + \left(f\frac{d_B}{2} + \mu\right)\sqrt{F_{f1}^2 + F_1^2}$$

式中，d_B 为主动滚轮轴承的轴径，一般主、从动滚轮取同一轴径。

焊接滚轮架所需驱动总功率 N（kW）

$$N = \frac{M_n n}{9\,550\eta}$$

式中，M_n 为主动滚轮所受总转矩，N·m；n 为主动滚轮转速，r/min；η 为总传动效率，若有一级蜗杆传动时，$\eta \approx 0.4$。

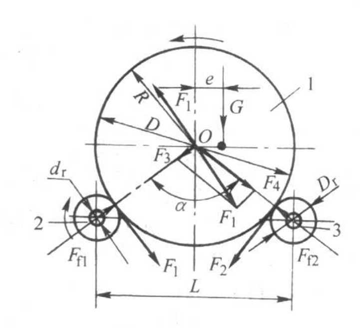


图 7.4-76 滚轮受力状态图

1—焊件；2—主动滚轮；3—从动滚轮

2）中心角的选择　使用焊接滚轮架时，选择合适的中心角，有利于焊件稳定而均匀地转动，并可减少滚轮的支反力和驱动圆周力，节省动力消耗。从单位质量主动滚轮圆周力 K_F 和单位质量滚轮支反力 K_Q 与中心角 α 的关系曲线（图 7.4-77、图 7.4-78）可知，应取在 120°以内比较合适，但再由图 7.4-79 中焊件非倾覆条件可知，α 过小，焊件易失稳倾覆，所以中心角一般在 45°～110°之间选用，为此，与中心角对应的焊件直径不应超越下述范围

$$D_{max} = \frac{L}{0.38} - D_r \qquad D_{min} = \frac{L}{0.82} - D_r \qquad (7.4\text{-}30)$$

式中，L 为滚轮中心距。

3）附着力验算　为了防止焊件在滚轮上打滑，还应按下式进行附着力验算

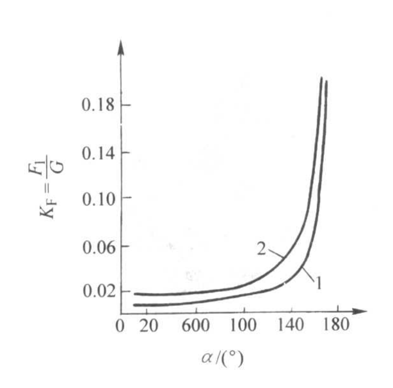


图 7.4-77 单位质量的主动滚轮圆周力与中心角的关系
1—滚动轴承；2—滑动轴承

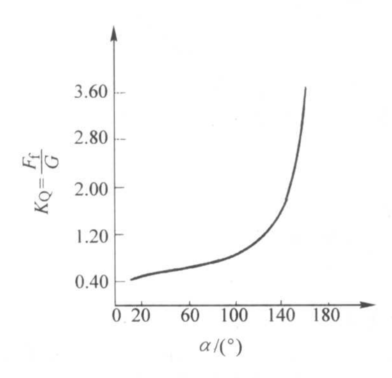


图 7.4-78 单位质量的滚轮支反力与中心角的关系
注：当偏心距 $e=0$ 时，作出此关系曲线，
故 $F_f=F_{f1}=F_{f2}$

$$F_{f1}\Phi \geqslant 3F_1$$

式中，Φ 为焊件在主动滚轮上的附着系数。对于钢轮 $\Phi=0.15$；对于橡胶轮 $\Phi=0.3\sim0.4$。

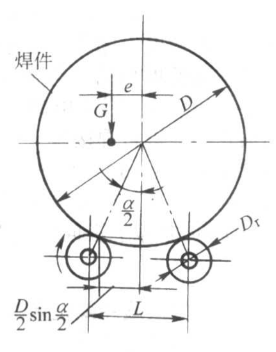


图 7.4-79 焊接滚轮架临界偏心距 e_k 的计算图
焊件非倾覆条件 $e<e_k=\frac{D}{2}\sin\frac{\alpha}{2}$

3.3.3 焊接滚轮架的选用及设计方案的考虑要点

国内外生产焊接滚轮架的厂家很多。国外生产的品种较多，系列较全。承载量 1～1500 t、适用焊件直径 1～8 m 的标准组合式滚轮架（两个主动轮座与两个从动轮座的组合）均成系列供应。其滚轮线速度多在 6～90 m/h 之间无级调速，有的还具有防止焊件轴向窜动的功能。

我国已有 23 家焊接辅机生产厂制造各种型号和规格的焊接滚轮架。最大承载量已达 650 t，最大适用焊件直径达 8.5 m，滚轮线速度多在 6～60 m/h 之间无级调速。防止轴向窜动的焊接滚轮架，个别厂家也有生产，但防窜性能有待完善。

国产焊接滚轮架的性能，除防窜性外，一般都可满足用户的使用要求，应予首选。但在选用时除应注意承载量、筒径和调速范围等性能参数满足使用要求外，对于偏心较大的焊件，还应使滚轮的驱动力矩大于焊件的偏心力矩。但目前生产厂家标示的性能参数均无此项数据，必要时，需作驱动力矩和附着力的校验。

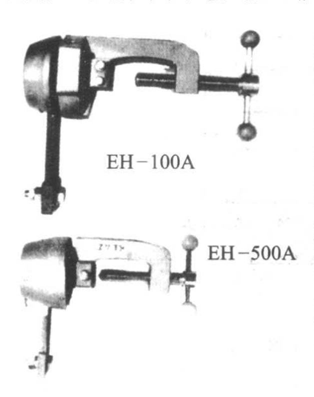
另外，对薄壁大径焊件使用的焊接滚轮架，为防止筒体轴向变形，宜选用多个混合式滚轮架的组合。

当选用不到合适的焊接滚轮架而需自行设计时，下述几点在确定设计方案时应予充分考虑。

1）拖动与调速　焊接滚轮架的拖动与调速，主要有两种方式：一种是直流电动机拖动，降压调速；一种是交流异步电动机拖动，变频调速。前者沿用已久，技术很成熟，电动机的机械特性较硬，启动力矩较大，是目前滚轮架使用最广的拖动、调速方式。缺点是电动机结构复杂，调速范围较窄，一般恒转矩的调速范围为 1:10 左右，低速时的速度不够稳定，有爬行现象。后者则随着电子逆变技术的发展和大电流晶体闸流管性能的完善，在技术上日趋成熟。其优点是调速范围宽，可达 1:20，转动平滑性好，低速特性硬。缺点是低速段过载倍数降低较大，变频电源的价格也较高，但随着电动机额定功率的增加，价格上升则相对平缓。例如，一台 11 kV·A 的变频电源和同功率的晶体闸流管调压直流电源相比，在价格上相差并不是很大。所以在重型焊接滚轮架上，采用交流异步电动机拖动和变频调速较为适宜。1994 年，上海交通大学为江南造船厂设计的 250 t 焊接滚轮架，用四台 3 kW 的交流并步电动机拖动，就采用了变频调速，使用至今，用户十分满意。

2）电动机的选配　为使焊接滚轮架的滚轮间距调节更为方便，机动性更强，组合更加便利，采用单独驱动的焊接滚轮架日益增多。但是，每一主动滚轮均由一台电动机驱动时，应解决好各滚轮转速的同步问题。由于制造工艺、材料性能等因素的影响，同一型号规格的电动机，其额定转速实际上并不一致，因此，要把实测数据最相近的一组电动机作为滚轮架的拖动电动机。另外，对重型焊接滚轮架，还应考虑以测速发电机为核心的速度反馈装置来保证各滚轮转速的同步。

3）导电装置　国外生产的焊接滚轮架，若滚轮是全钢结构的，多自带图 7.4-61a 所示的电刷式导电装置。电刷与金属轮毂或轮辋接触，沟通焊接电源的二次回路。若是橡胶轮缘，则常采用市售旋转式导电装置（图 7.4-80），国产焊接滚轮架，即使滚轮是全钢结构的，也很少自带导电装置。国内也没有专门厂家生产和销售滚轮架使用的导电装置，多数是用户自行设计制造的，结构形式较多（图 7.4-81），其过流能力在 500～1 000 A 之间，最大可达 2 000 A。图 7.4-81a、b 都是卡在焊件上的导电装置，前者用电刷导电；后者用铜盘导电，其导电性能可靠，不会在焊件上起弧。图 7.4-



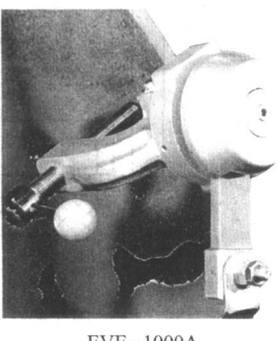


图 7.4-80 旋转式导电装置

图 7.4-81 焊接滚轮架的各种导电装置

1—夹持轴；2—电刷；3—电刷盒；4—接地电缆；5—焊件；6—铜盘；
7—导电块；8—限位螺栓；9—黄铜弹簧板；10—配重

81c、d、e是导电块与焊件直接接触导电，导电块用含铜石墨制作，许用电流密度大，但若焊件表面粗糙或有氧化皮等脏物时，易在接触处起弧，造成对焊件表面的损伤。

4）滚轮结构　前已述及，焊接滚轮架的滚轮结构主要有四种类型，适用于不同场合。其中，橡胶轮缘的滚轮常因结构不合理，或橡胶质量不佳或挂胶工艺不完善，使用不久就会发生挤裂、脱胶而损坏。为此，设计滚轮时常将橡胶轮缘两侧开出15°的倒角（图7.4-82），以留出承压后橡胶变形的空间，避免挤裂。另外，常在橡胶轮辋与金属的结合部，将金属轮面开出多道沟槽，以增加橡胶与金属的接触面积，强化结合牢固，避免脱胶（图7.4-82）。至于橡胶成分和挂胶工艺，在美国是一项专利，中国兰州石油化工机器厂将国产橡胶轮缘的坦克支重轮用在焊接滚轮架上取得了很好的效果，使滚轮寿命延长了许多。

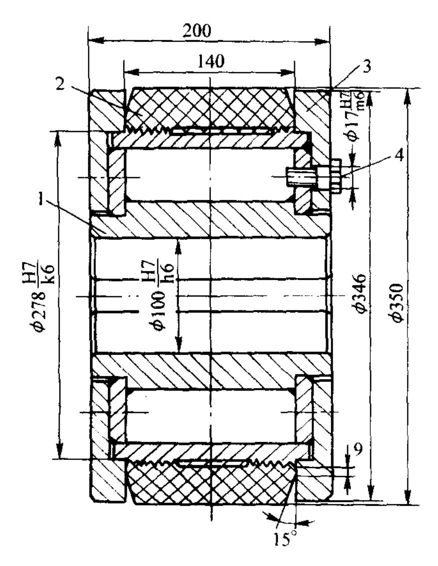


图 7.4-82 滚轮结构

1—轮毂；2—橡胶轮辋；3—压板；4—螺栓

金属材料的滚轮，多采用铸钢和合金球墨铸铁制作，其表面热处理硬度约为HRC50。

5）联机接口　焊接滚轮架往往与焊接操作机配合，进行焊接作业，因此在其控制回路中要留有联机作业的接口，以保证两者的运动连锁与协调。

6）标准化要求　我国颁布了焊接滚轮架的行业标准（JB/T 9187—1999）。该标准对滚轮架和滚轮形式进行了分类，并规定主动滚轮的圆周速度应在6～60 m/h范围内无级可调，速度波动量按不同的焊接工艺要求，要低于±5%和±10%，滚轮转速应稳定、均匀，不允许有爬行现象。传动机构中的蜗轮副、齿轮副等传动零件，应符合国标中的8级精度要求。滚轮架的位置精度，标准中也有明确的规定，同时要求焊接滚轮架必须配备可靠的"焊接电缆旋转接地器"（即导电装置）。标准中还规定"按GB150规定制造的筒体类工件在防轴向窜动滚轮架上进行焊接时，在整个焊接过程中允许工件的轴向窜动量为±3 mm"。标准中也规定了滚轮架额定载重量的数值系列、滚轮直径及许用焊件的最小、最大直径（见表7.4-25），同时推荐了不同额定载重量时的驱动总功率（见表7.4-26）。

表 7.4-25 焊接滚轮架技术参数

（摘自 JB/T 9187—1999）

滚轮直径/mm	额定载重量（X_1）/t									筒体工件直径/mm	
	0.6	2	6	10	25	60	100	180	250	最小直径	最大直径
220	+									200	1 000
250		+	+	+						250	1 600
315			+	+	+					315	2 500
400				+	+					400	3 150
500				+	+	+	+			500	4 000
630					+	+	+	+		630	5 000
800						+	+	+	+	800	6 300
1 000								+	+	1 000	8 000
1 250									+	1 250	



表 7.4-26　焊接滚轮架驱动功率推荐值
（摘自 JB/T 9187—1999）

额定载重量（X_1）/t	0.6	2	6	10	25	60	1 000	160	250
电机最小功率/kW	0.4	0.75	1	1.4	1.4	2.2	2.8	2.8	5.6

注：所列功率值为一台电动机驱动一对主动滚轮时的功率，如果用两台电动机分别驱动两个主动滚轮时，电动机功率值应为表中所列数值的 1/2。

读者在设计焊接滚轮架时，应当严格遵守以上规定。

3.3.4　防止焊件轴向窜动的技术

1）问题的提出　焊件滚轮架驱动焊件绕其自身轴线旋转时，往往伴有轴向的窜动，从而影响焊接质量和焊接过程的正常进行，严重时会导致焊接过程的中断，甚至发生焊件从滚轮架上掉下等设备事故和人身事故。因此，国内一些工厂常采用在焊件端头硬顶的办法，强行制止焊件的窜动。这种办法，对小吨位焊件还较有效，但对大吨位焊件以及实施对焊缝位置精度和焊速稳定性要求很高的带极堆焊、窄间隙焊等焊接方法时，由于焊件质量大，形成的轴向窜动力很大，采用阻挡的办法往往挡不住，即使挡住了，焊件运行阻力增大，引起转速不稳定，易产生焊接缺陷，并使焊件端部已加工好的坡口因挤压而破坏，有的还会发生电机过载运行烧坏的事故。在此背景下，国外开发出了防窜技术，并于 20 世纪 80 年代中期推出了防止焊件轴向窜动的焊接滚轮架，将焊件的窜动量控制在 ± 2 mm 以内，满足了各种焊接方法对施焊位置精度的要求。

2）焊件发生轴向窜动的原因　由于焊接滚轮架的制造安装误差和焊件的几何形状不规则等原因，导致前后排滚轮存在高差和滚轮轴线与焊件轴线不平行，使焊件出现重力轴向分量和焊件与滚轮的接触处出现轴向分力，是导致焊件轴向窜动的原因。通常，前后排滚轮的高差比较容易控制，再加上前后排滚轮架的距离较大，焊件自重产生的轴向分量比轴线不平行产生的轴向分量要小得多，因此控制滚轮各轴线与焊件轴线的平行度是控制焊件轴向窜动的关键。试验结果和分析表明：滚轮轴线与焊件轴线越不平行，滚轮与焊件接触处形成的螺旋角越大，则焊件窜动速度越快，并在一定范围内，与螺旋角的正切函数成线性增长关系；焊件转动的线速度与轴向窜动的速度成正比变化；同向偏转同一角度的滚轮数越多，焊件轴窜速度越快，成非线性增长关系；焊件的偏重和椭圆度使轴窜速度呈周期性变化；随着焊件质量的增加，其轴窜速度几乎没有增加；各滚轮轴线在同一水平面的情况下，滚轮的间距、滚轮架的相互距离对轴窜速度没有影响。

根据上述轴窜机理和试验分析说明，为了防止焊件轴向窜动，在制造和使用焊接滚轮架时，应注意做到：各滚轮轴线在同一水平面内，并相互平行；滚轮间距应相等；滚轮架位于同一中心线上。

3）防轴窜焊接滚轮架的执行机构　安放在焊接滚轮架上的焊件，若在旋转过程中伴有轴向窜动（向前或向后），实际上，焊件是在做螺旋运动（左旋或右旋），若采取某种措施，把焊件左旋运动改为右旋运动，或将右旋运动改为左旋运动，则焊件便向初始位置返回。要达到这一目的，从原理上讲，凡能改变滚轮轴线与焊件轴线之间螺旋角的一切执行机构，均可实现焊件螺旋运动方向的改变，即在不改变焊件转向的前提下，使焊件轴向位移的方向发生改变。从此原理出发，已有三种结构形式的执行机构可实现此要求。

① 偏转式执行机构。如图 7.4-83a 所示，当焊件发生左向轴线窜动时，位移传感器便发出信号，控制机电装置动作，使从动滚轮在水平面内逆时针转一角度 α，此时焊件在摩擦力 F 分力 F_1 的作用下开始向右移行，当焊件越过标定线后，位移传感器又发出信号，使从动滚轮顺时针偏转，则焊件向左移行（图 7.4-83b），这样焊件在动态调节过程中稳定在给定的位置范围内，达到防轴窜的目的。

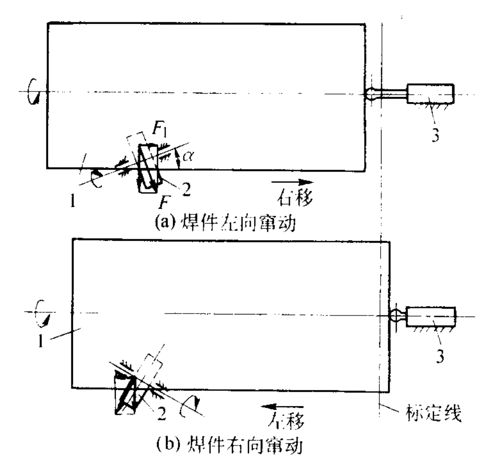


图 7.4-83　偏转式执行机构的调节原理（俯视图）
1—焊件；2—从动滚轮；3—位移传感器

偏转式执行机构如图 7.4-84、图 7.4-85 所示。前者是通过油缸推动转动支座使从动滚轮偏转的。后者是电动机经减速后通过与小齿轮啮合的扇形齿轮，使从动滚轮偏转的。

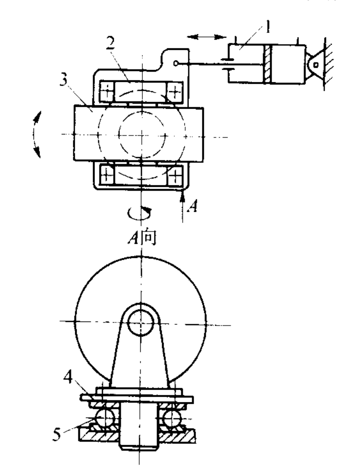


图 7.4-84　液压驱动的偏转式执行机构
1—液压缸；2—轴承座；3—从动滚轮
4—转动支座；5—止推轴承

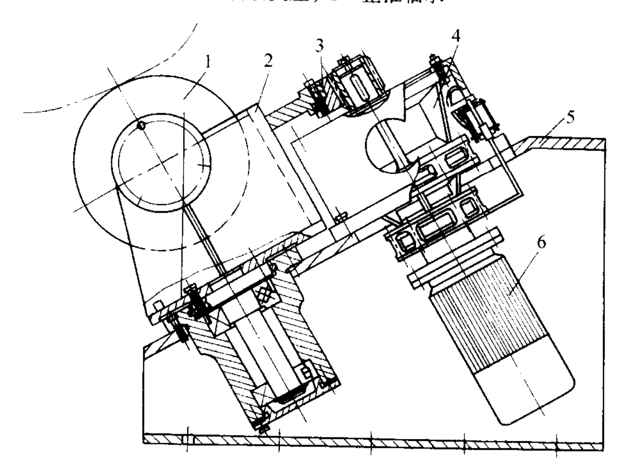


图 7.4-85　电机驱动的偏转式执行机构
1—从动滚轮；2—偏转座；3—扇形齿轮；
4—摆线针轮减速器；5—底座；6—电动机



② 升降式执行机构　如图 7.4-86 所示，当控制从动滚轮升降时（由 B 到 B_1 点），焊件轴线在空间相对于从动滚轮轴线发生偏斜，其轴线在水平面的投影角为 α，垂直面的投影角为 β。这样在水平面内，焊件相对于从动滚轮偏转了一角度 α，其作用和上述从动滚轮相对焊件偏转一角度 α 是一样的。另外，垂直面内投影角 β 的出现，使焊件自重产生轴向分量，这两种因素综合作用，将使焊件轴向位移的方向发生改变。

升降式执行机构如图 7.4-87、图 7.4-88 所示，前者是通过机电控制，使电机正反转，带动杠杆梁绕支点转动，使从动滚轮升降。后者是通过电液伺服阀，控制液压缸活塞杆的伸缩，使从动滚轮升降。

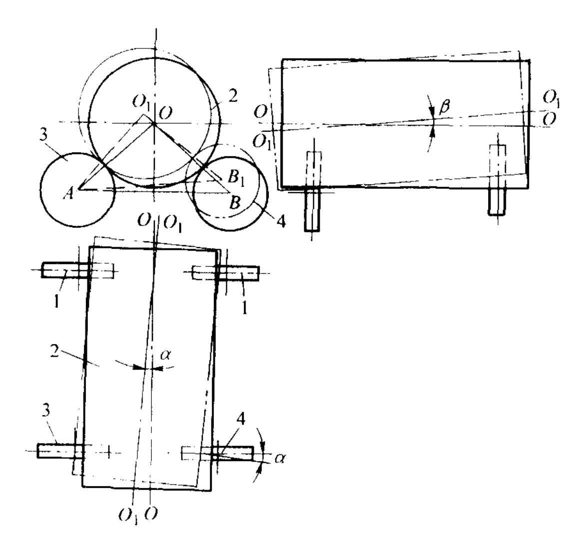


图 7.4-86　升降式执行机构的调节原理
1—主动滚轮；2—焊件；3—从动滚轮；4—升降式从动滚轮

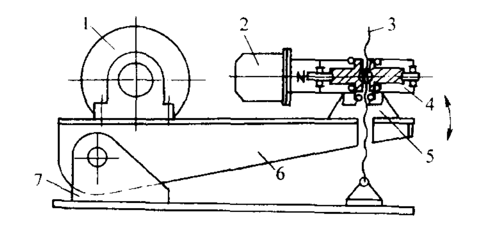


图 7.4-87　电机驱动的升降式执行机构
1—从动滚轮；2—减速电动机；3—举升丝杠；4—非标蜗轮减速器；5—蜗轮减速器的铰接支座
6—杠杆梁；7—底座

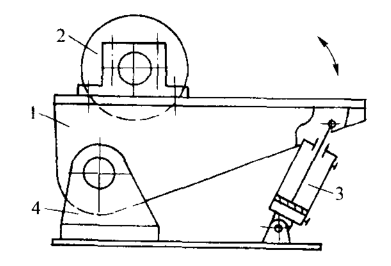


图 7.4-88　液压驱动的升降式执行机构
1—杠杆梁；2—从动滚轮；3—举升液压缸；4—支座

③ 平移式执行机构　如图 7.4-89 所示。当控制位于同一滚轮架上的两从动滚轮沿垂直于焊件轴线的方向同步水平移动时，例如从 A 点移到 B 点，则在从动滚轮的推动下，焊件以主动滚轮为支点发生位移，其轴线由 OO 位置偏至 O_1O_1 位置，使焊件轴线相对于滚轮轴线出现偏转角 α，从

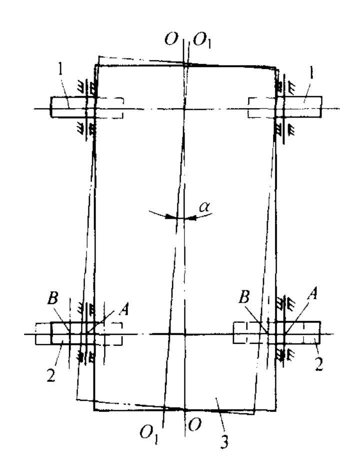


图 7.4-89　平移式执行机构的调节原理（俯视图）
1—主动滚轮；2—从动滚轮；3—焊件

而达到调节焊件轴向位移方向的目的。

平移式执行机构如图 7.4-90、图 7.4-91 所示，前者控制电动机（图中未画出）的正反转，经针轮摆线减速器减速后，驱动曲柄在 $\pm\alpha$ 角度的范围内转动，从而带动连杆使滑块座平移，而滑块座是通过直线轴承与从动滚轮座固接在一起的，直线轴承套装在光杠上，这样，从动滚轮座根据位移传感器发出的信号，沿光杠向左或向右移动，以调节焊件轴向位移的窜动方向。后者是液压驱动的平移式执行机构，从动滚轮座沿光杠的移行，是根据位移传感器的信号，由电磁换向阀控制液压缸活塞杆的伸缩来实现的。

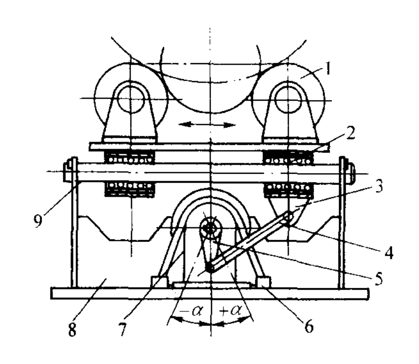


图 7.4-90　电机驱动的平移式执行机构
1—从动滚轮座；2—直线轴承；3—滑块座；4—连杆；5—曲柄；6—针轮摆线减速器；7—曲柄轴承座；8—底座；9—光杠

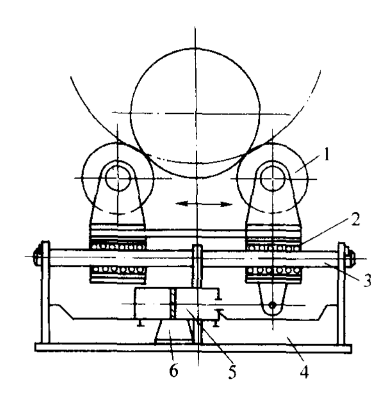


图 7.4-91　液压驱动的平移式执行机构
1—从动滚轮座；2—直线轴承；3—光杠；4—底座；5—液压缸；6—液压缸支座

上述三种执行机构的性能比较见表 7.4-27。



表 7.4-27 三种防窜执行机构的性能比较

比较内容	偏转式	升降式	平移式
调节灵敏度	高	较高	较高
调节精度	较高	高	较高
滚轮与焊件的磨损	大	较大	较小
机构横向尺寸	小	较大	较小
滚轮间距的调节	可以	可以	一般不能
对焊接位置精度的影响	无	在从动轮一侧稍有影响	在从动轮一侧稍有影响
对焊件直径的适用范围	宽	宽	较窄
从动轮的结构	钢轮	钢轮或组合轮	钢轮或组合轮
使用场合	多用于 5 ~ 100 t 的焊件	多用于 100 t 以上的焊件	多用于 5 ~ 50 t 的小径厚壁焊件

3.3.5 焊剂垫装置

进行埋弧焊时，为了背面成形及防止将焊件烧穿，常在焊缝背面敷以衬垫，衬垫可以采用紫铜的、石棉的，也可以是石墨或焊剂的，但常用的是焊剂的。滚轮架上用的焊剂垫，有纵缝用的和环缝用的两种。图 7.4-92 是焊接内纵缝用的软管式焊剂垫。气缸动作将焊剂槽举 3 升接近焊件表面，然后，夹布胶管 6 充气鼓胀，将帆布衬槽 5 托起，使焊剂与焊缝背面贴紧。这种装置结构简单，压力均匀，也可用于焊缝背面的成形。图 7.4-93 是用于内环缝的圆盘式焊剂垫。转盘在摩擦力的作用下随焊件的转动而绕自身的主轴旋转，将焊剂连续不断地送到施焊处。其结构简单，使用方便，国内焊接辅机厂已有定型产品供应。图 7.4-94 是螺旋推进式的焊剂垫，也用于内环缝的焊接。该装置移行方便，可达性好，装置上的螺旋推进器可使焊剂自动循环。缺点是焊剂垫透气性差，焊剂易铰碎。这种装置国内也有定型产品供应。

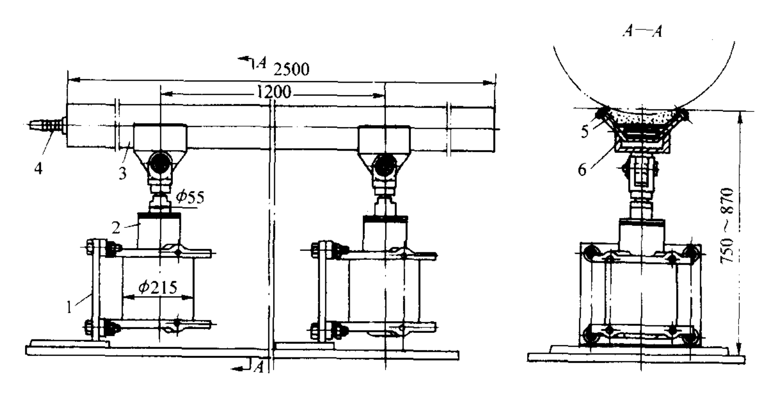


图 7.4-92 软管式纵缝焊剂垫

1—气缸支座；2—举升气缸；3—焊剂槽；4—气嘴；5—帆布衬槽；6—夹布胶管

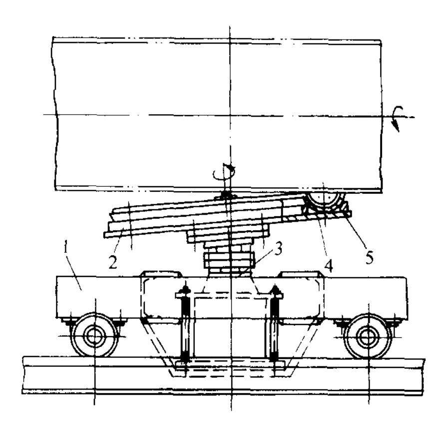


图 7.4-93 圆盘式环缝焊剂垫

1—行走台车；2—转盘；3—举升气缸；4—环行焊剂槽；5—夹布橡胶衬槽

3.4 焊接翻转机及回转台

3.4.1 焊接翻转机

焊接翻转机是将焊件绕水平轴转动或倾斜，使之处于有利装焊位置的焊件变位设备。

焊接翻转机种类较多，常见的有框架式、头尾架式、链式、环式、推举式等翻转机（图 7.4-95），其使用场合见表 7.4-28。

头尾架式翻转机，其头架可单独使用，如图 7.4-96 所示，在其头部工作台上安装相应夹具后，可用于短小焊件的翻转变位。有的翻转机尾架做成移动式的，以适应不同长度焊件的翻转变位，其中对应用在大型构件上的翻转机，工作台常作成升降式的。

目前我国还未对各种形式的焊接翻转机制定出系列标准，但国内已有厂家生产框架式和头尾架式的翻转机，其中后者已成系列，其技术数据见有关产品样本。

配合焊接机器人使用的框架式、头尾架式翻转机，国内外均有生产。它们都是点位控制，控制点数以使用要求而定，但多为 2 点（每隔 180°）、4 点（每隔 90°）、8 点（每隔 45°）控制，翻转速度以恒速的为多，但也有变速的。翻转机与机器人联机按程序动作，载重量多在 20 ~ 3 000 kg 之间。

我国汽车、摩托车和工程机械等制造行业使用的弧焊机器人加工中心，已成功地采用了国产头尾架式和框架式的焊接翻转机，由于是恒速翻转，点位控制，并辅以电磁制动和气缸锥销强制定位，所以多采用交流电动机驱动、普通齿轮副减速，机械传动系统的制造精度比轨迹控制的低 1 ~ 2 级，造价便宜。

图 7.4-81 所示的各种导电装置也应用在翻转机上，其中图 7.4-81a、b 宜用在环式、链式，推举式翻转机上。若将该图中的夹持轴（件 1）改成框架式或头尾架式翻转机的轴颈，也即成为这两种翻转机常用的导电装置。图 7.4-81c、d、e 所示的导电装置，在头尾架式的翻转机上有所应用。

焊接翻转机驱动功率的计算见表 7.4-29。

3.4.2 焊接回转台

焊接回转台是将焊件绕垂直或倾斜轴回转的焊件变位设备（图 7.4-97）。主要用于回转体焊件的焊接、堆焊与切割。



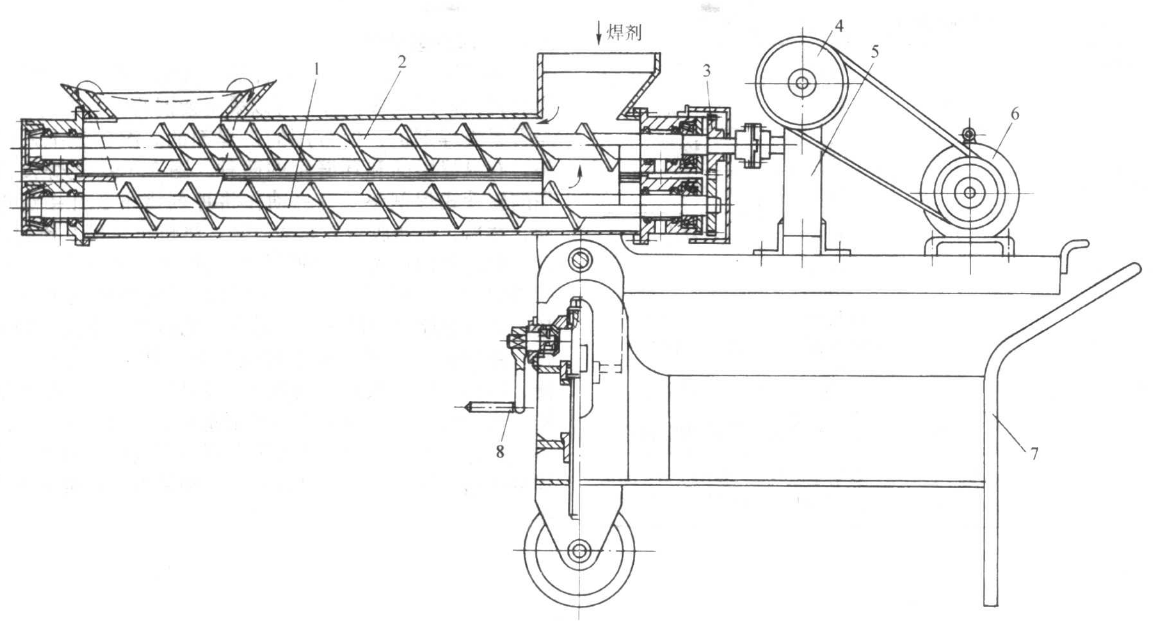


图 7.4-94　螺旋推进式环缝焊剂垫

1—焊剂回收推进器；2—焊剂输送推进器；3—齿轮副；4—带传动；5—减速器；6—电动机；7—小车；8—手摇升降机构

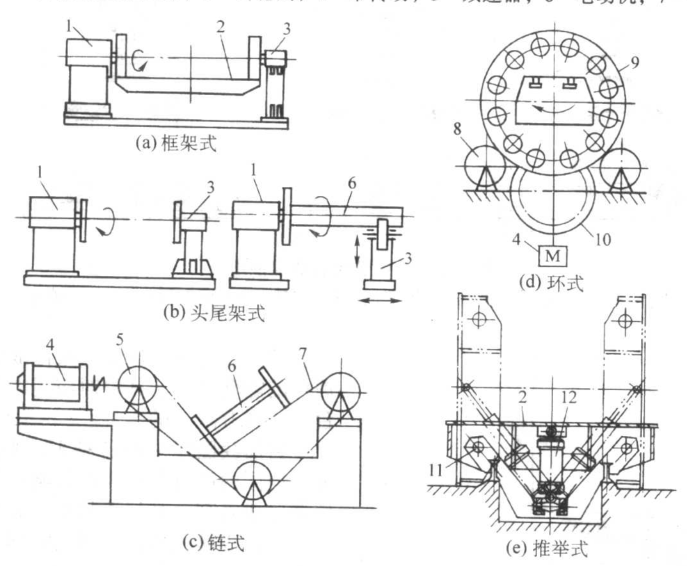


图 7.4-95　焊接翻转机

1—头架；2—翻转工作台；3—尾架；4—驱动装置；5—主动链轮；6—焊件；7—链条；8—托轮；9—支撑环；10—钝齿轮；11—推拉式轴销；12—举升液压缸

表 7.4-28　焊接翻转机

形式	变位速度	驱动方式	使用场合
框架式	恒定	机电或液压（旋转液压缸）	板结构、桁架结构等较长焊件的倾斜变位，工作台上也可进行装配作业
头尾架式	可调	机电	轴类和椭圆形焊件的环缝焊以及表面堆焊时的旋转变位
链式	恒定	机电	已装配定位焊且自身刚度很强的梁柱型构件的翻转变位
环式	恒定	机电	已装配定位焊且自身刚度很强的梁柱型构件的转动变位，多用于大型构件的组对与焊接
推举式	恒定	液压	各类非长形构件的倾斜变位。装配和焊接作业在同一工作台上进行

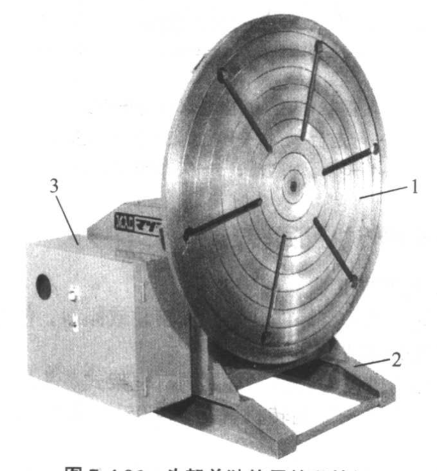


图 7.4-96　头架单独使用的翻转机

1—工作台；2—底座；3—控制箱

表 7.4-29　焊接翻转机驱动功率计算公式

结构形式			传动简图	计算公式
头尾架式翻转机	用摩擦力夹紧焊件	滑动轴承		$M = Gf \times \frac{d}{2} + \frac{2}{3} f_1 \times \frac{\left(\frac{d_1}{2}\right)^3 - \left(\frac{d_0}{2}\right)^3}{\left(\frac{d_1}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_0}{2}\right)^2} Q$ $Q = \frac{Pld}{1.27}$
		滚动轴承		$M = 1.3\mu G\left(1 + \frac{D_0}{\delta}\right) + \frac{\mu DQ}{\delta}$ $Q = \frac{Pld}{1.27}$
	用卡盘夹紧焊件	滑动轴承		$M = Gf \times \frac{d}{2}$
		滚动轴承		$M = 1.3\mu G\left(1 + \frac{D_0}{\delta}\right)$
框架式翻转机		滑动轴承	综合重心	$M_1 = Gf \times \frac{d}{2}$ $M_2 = Ge$ $M = K(M_1 + M_2)$
环式翻转机		滑动轴承	支撑环 支撑滚轮 带钝齿轮的支撑滚轮	$M_2 = Ge$ $M_3 = \frac{G}{\cos\alpha}\mu\left(\frac{R}{r} + 1\right)$ $M_4 = \frac{G}{\cos\alpha} f \frac{r_1}{r} R$ $M = K(M_3 + M_4) + M_2$
翻转机驱动功率			$N = \frac{Mn}{9\,550 \times 10^3 \eta}$	

注：1. 头尾架式翻转机未考虑偏心力矩的影响。

2. M 为驱动力矩，N·mm；G 为焊件和机器翻转部分的质量，N；f 为轴颈处的滑动摩擦因数；d 为轴径（见表图），mm；f_1 为止推轴颈处的滑动摩擦因数；d_1 为卡盘摩擦外径（见表图），mm；d_0 为卡盘摩擦内径（见表图），mm；Q 为轴向夹紧力，N；P 为单位夹紧力，MPa，其中铜与钢为 13 ~ 20 MPa，钢与铜为 6 ~ 9 MPa，铜与铸铁为 1.5 ~ 2.5 MPa；l 为轴颈长度，mm；μ 为滚动摩擦因数，mm；D_0 为向心轴承的内圈外径，mm；δ 为轴承滚珠直径，mm；D 为推力轴承座圈的中径，mm；e 为偏心距（见表图），mm；M_1 为轴颈处的滑动摩擦阻力矩，N·mm；M_2 为偏心阻力矩，N·mm；K 为考虑惯性力的系数，为 1.2 ~ 1.3；M_3 为支撑滚轮与支撑环接触处的阻力矩，N·mm；α 为支撑滚轮的斜角（见表图）（°）；R 为支撑环的半径（见表图），mm；r 为支撑轮的半径（见表图），mm；r_1 为支撑轮转轴半径（见表图），mm；M_4 为支撑轮转轴处的摩擦阻力矩，N·mm；N 为驱动功率，kW；n 为终端输出轴转速，r/min；η 为传动系统的总效率。

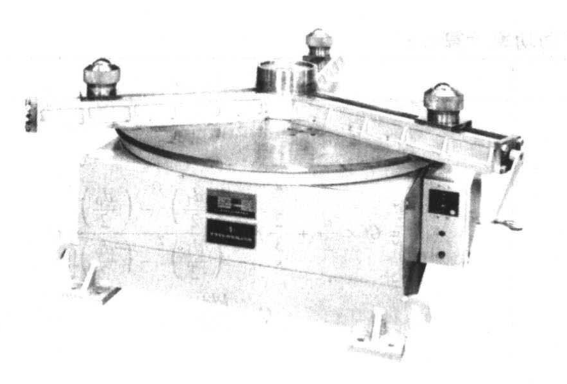


图 7.4-97 焊接回转台

焊接回转台多采用直流电机驱动，工作台转速均匀可调。对于大型绕垂直轴旋转的焊接回转台，在其工作台面下方，均设有支撑滚轮，工作台面上也可进行装配作业。有的工作台，还做成中空的，以适应管材与接盘的焊接。

焊接回转台驱动功率的计算与焊接变位机回转功率的计算相同，由于回转台转轴的倾斜角度是固定的，因此计算更为简单。

我国已有厂家生产焊接回转台，并成系列供应，其数据见有关产品样本。

3.5 焊接操作机

3.5.1 主要结构形式及使用场合

焊接操作机是将焊接机头准确地送到并保持在待焊位置或以选定的焊速沿设定的轨迹移动焊接机头的焊机变位设备。

焊接操作机的结构形式有多种，主要有以下几种。

1）平台式操作机 焊机放置在平台上，可在平台上移动；平台安装在立架上，能沿立架升降；立架座落在台车上，可沿轨道运行。该操作机作业范围较大，主要用于外环缝、外纵缝的焊接（图 7.4-98）。

平台式操作机又分为单轨台车式（图 7.4-98）和双轨台车式两种，单轨台车式的操作机实际上还有一条轨道，不过该轨道一般设置在车间立柱上，车间内桥式起重机移动时，往往引起平台振动，从而影响焊接过程的正常进行。平台式操作机的机动性、使用范围、用途均不如伸缩臂式的焊接操作机，在国内的应用已逐年减少。

2）伸缩臂式操作机 焊接机头或焊接小车安装在伸缩臂的一端，伸缩臂安装在滑鞍上，可沿滑鞍伸进伸出。滑鞍安装在立柱上，可沿立柱升降，立柱有的直接固定在底座上，有的虽然安装在底座上，但可回转；有的立柱还通过底座，安装在台车上，可沿轨道行驶。这种操作机机动性好，作业范围大，与各种焊件变位设备相配合，可进行回转体焊件内外环缝、内外纵缝、螺旋焊缝的焊接，以及内外表面的堆焊，还可焊接构件上的横焊缝、斜焊缝等空间线形焊缝，是国内外应用最多的一种焊接操作机。它除了用于焊接外，若在伸缩臂前端安上相应的作业机头，还可进行磨修、切割、喷漆、探伤等作业，用途很广泛（图 7.4-99）。

为了扩大焊接机器人的作业空间，国外将焊接机器人安

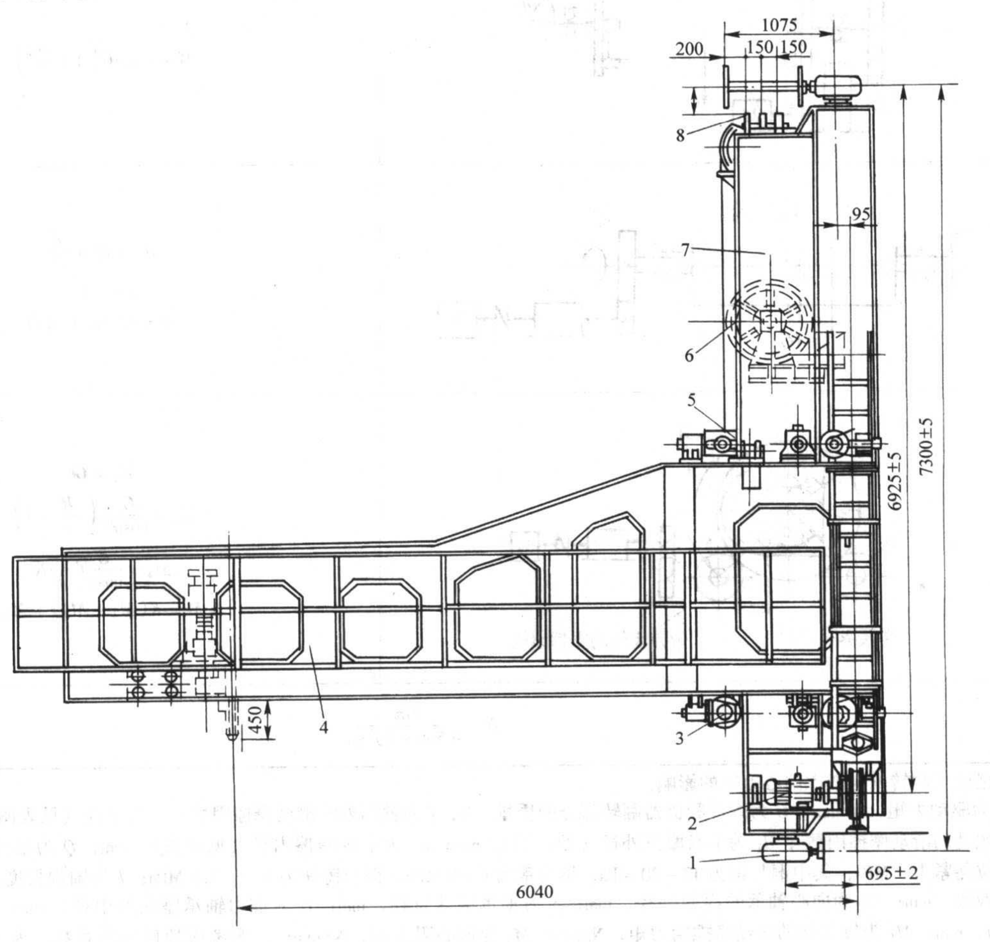


图 7.4-98 平台式操作机

1—水平轮导向装置；2—台车驱动机构；3—垂直导向轮装置；4—工作平台；5—起重铰车；6—平台升降机构；7—立架；8—集电器



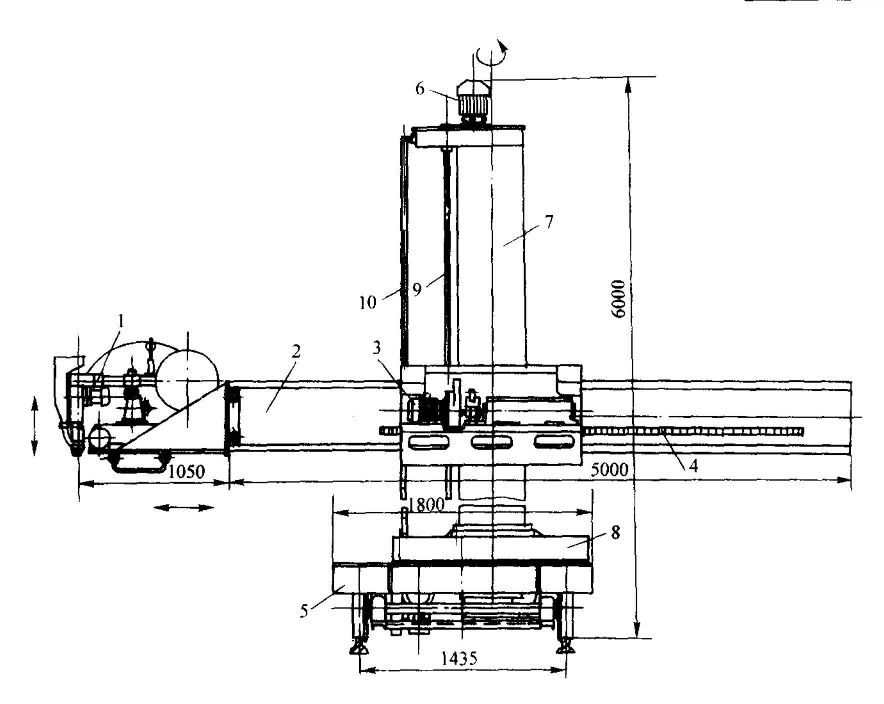


图 7.4-99 伸缩臂式操作机

1—焊接小车或焊接机头；2—伸缩臂；3—滑鞍和伸缩臂进给机构；4—传动齿条；5—行走台车；6—伸缩臂升降机构；7—立柱；8—底座及立柱回转机构；9—传动丝杠；10—扶梯

装在重型操作机伸缩臂的前端，用来焊接大型结构。另外，伸缩臂式操作机的进一步发展，就成了直角坐标式的工业机器人，它在运动精度、自动化程度等方面都比前者具有更优良的性能。

3）门式操作机 这种操作机有两种结构，一种是焊接小车座落在沿门架可升降的工作平台上，并沿平台上的轨道横向移行（图 7.4-100）；另一种是焊接机头安装在一套升降装置上，该装置又座落在跑车上，而跑车沿横梁上的轨道移行。这两种操作机的门架，一般都横跨车间，并沿轨道纵向移动，操作机工作覆盖面很大，主要用于板材的大面积拼接和大面积金属结构以及筒体外环缝外纵缝的焊接。

为了扩大焊接机器人的作业空间，满足焊接大型焊件的需要或者为了提高设备的利用率，也可将焊接机器人倒置在门式操作机上。其中，机器人本体除可沿门架横向移动外，有的还可以升降和纵向移动，这样，又进一步地增强了机器人作业的灵活性、适应性和机动性。

除弧焊机器人使用的门式操作机结构尺寸相对较小外，其他门式操作机的结构都很庞大，在大型金属结构厂和船厂应用较多。

4）台式操作机 这种操作机与伸缩臂式操作机的区别是没有立柱，伸缩臂通过鞍座安装在行走台车或底座上，伸缩臂的前端安有焊枪或焊接机头，能以焊速伸进伸出，多用于小径筒体内环缝、内纵缝的焊接（图 7.4-101）。

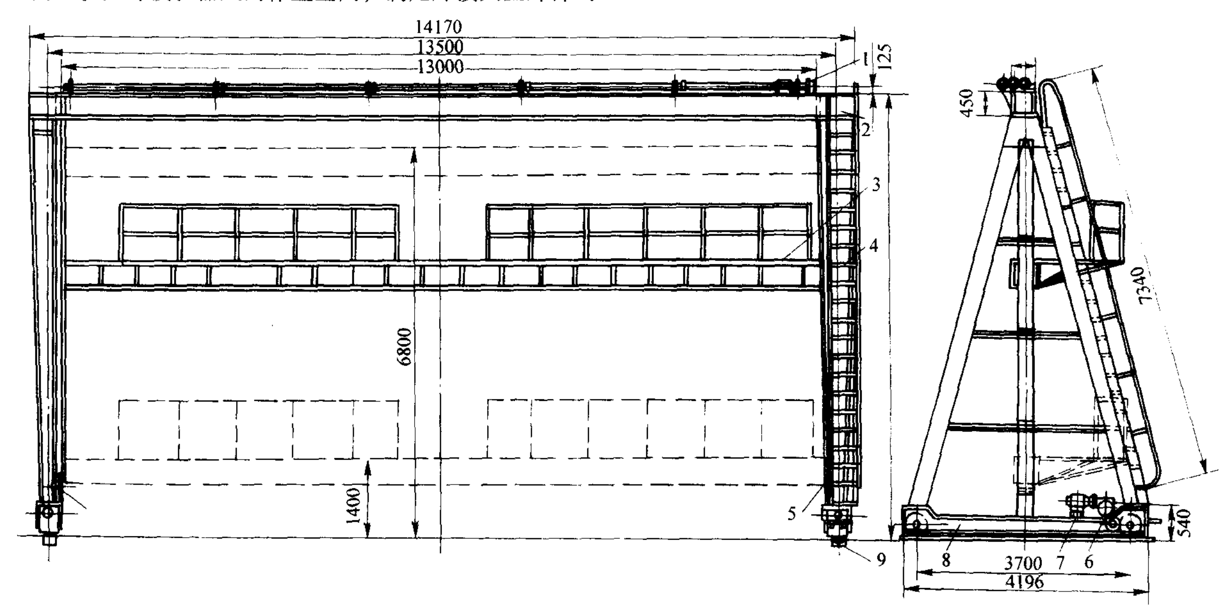


图 7.4-100 门式操作机

1—平台升降机构；2—门架；3—工作平台；4—扶梯；5—限位器；6—台车驱动机构；7—电动机；8—行走台车；9—轨道





图 7.4-101　埋弧焊用的台式操作机

1—鞍座；2—伸缩臂；3—焊接机头；4—底座

3.5.2　传动形式与驱动机构

1）工作平台与伸缩臂的升降　操作机工作平台的升降多为恒速或快慢两挡速度；伸缩臂升降多为快慢两速或无级调速，速度在 0.5～2 m/min 之间者为多，其传动形式见表 7.4-30。

表 7.4-30　操作机升降系统的传动形式

传动形式	驱动机构	性能及适用范围	备注
链传动	电动机驱动链轮，通过链条使平台或伸缩臂升降。小型操作机采用单列链条，大型的采用多列链条	制造成本低，运行稳定可靠，但传动精度不如螺旋和齿条传动，在平台式、伸缩臂式操作机上广泛采用	链条一端设有平衡重，恒速升降
螺旋传动	电动机通过丝杠驱动螺母运动以带动平台或伸缩臂升降（图 7.4-99）。对起升高度不大的小型操作机，也可手动	运行平稳，传动精度高，多用在起升高度不大的各种操作机上	丝杠下端多为悬垂状态，恒速或变速升降
齿条传动	电动机与其驱动的齿轮均安装在伸缩臂的滑鞍上，齿轮与固定在立柱上的齿条相啮合，从而带动伸缩臂升降。小型操作机采用单列齿条，大型的采用双列齿条	运行平稳可靠，传动精度最高，制造费用最大，多用在要求精确传动的伸缩臂式操作机上	恒速或变速升降
钢索传动	电动机驱动钢索卷筒，卷筒上缠绕着钢丝绳，钢丝绳的一端通过滑轮导绕系统与平台或伸缩臂相连，带动其升降（图 7.4-102）	投资最省，运行稳定性和传动精度低于以上各种传动，适用于大升降高度的传动，在平台式操作机上应用最多，在伸缩臂式操作机上已不多用	恒速升降

操作机升降系统，若恒速升降，多采用交流电机驱动，若变速驱动，多采用直流电机驱动，近来国外一些公司在伸缩臂式操作机上也开始采用交流变频驱动，以及直流或交流伺服电机驱动。在升降的两个极限位置，应设有行程限位开关。除螺旋传动的以外，在滑鞍与立柱的接触处应设有防平台或伸缩臂坠落的装置。该装置有两种类型，一种是偏心圆或凸轮式的，一种是楔块式的。

另外，为了减少升降系统的驱动功率，并使升降运动更加平稳，在大中型的操作机上，均设有重力平衡系统，用配重来平衡平台或伸缩臂等构件的自重。

2）伸缩臂的回转　伸缩臂的回转运动有手动和恒速电动两种，前者多用于小型操作机中（图 7.4-103），后者多用于大中型操作机中（图 7.4-99）。回转速度一般为 0.6 r/min，在回转系统中还设有手动锁紧装置。不管是圆形立柱或是非圆立柱，伸缩臂的回转形式几乎都采用立柱自身转动式，其立柱底端可直接手驱动回转；或通过电机驱动齿圈回转，而

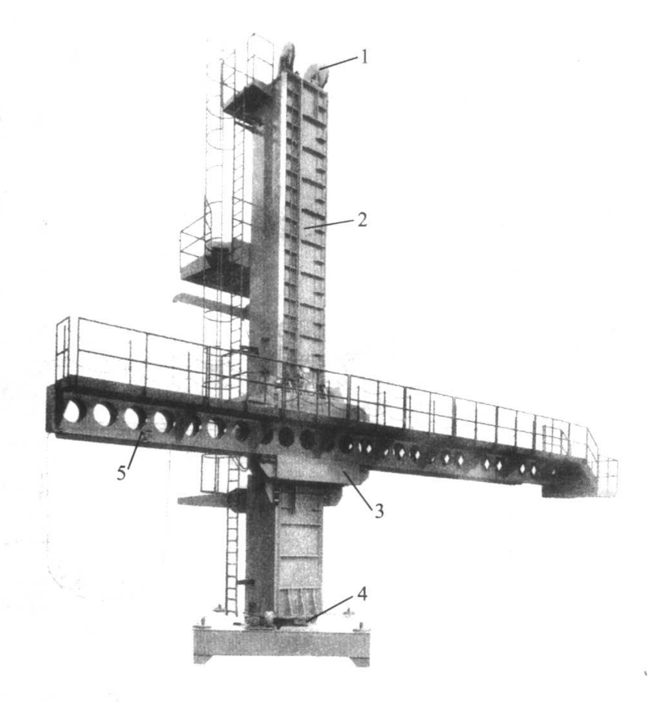


图 7.4-102　伸缩臂式操作机

1—钢索滑轮导绕系统；2—立柱；3—滑鞍；4—立柱回转机构；5—伸缩臂

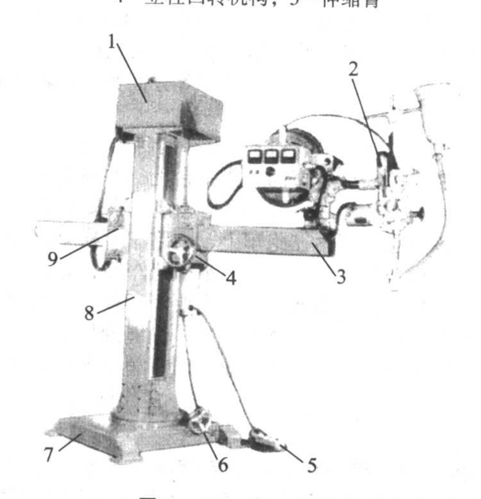


图 7.4-103　小型操作机

1—伸缩臂升降驱动系统；2—焊接机头；3—伸缩臂；4—伸缩臂手摇进给机构；5—升降按钮盒；6—立柱手摇回转机构；7—底座；8—立柱；9—滑鞍

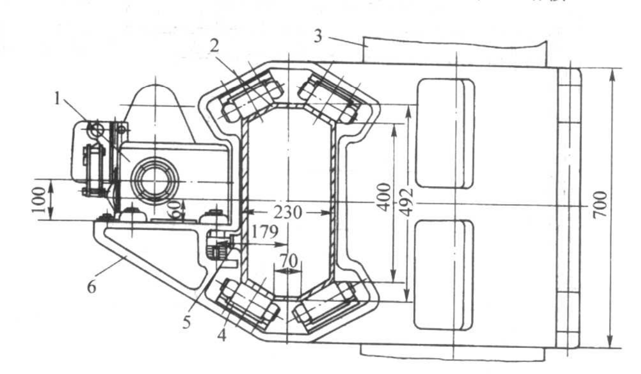


图 7.4-104　伸缩臂进给系统结构图

1—驱动装置；2—伸缩臂；3—立柱；4—托辊；5—齿轮与齿条或链轮与链条；6—滑鞍



齿圈座落在推力轴承上，保证了立柱的灵活转动。其传动机构见图 7.4-105。

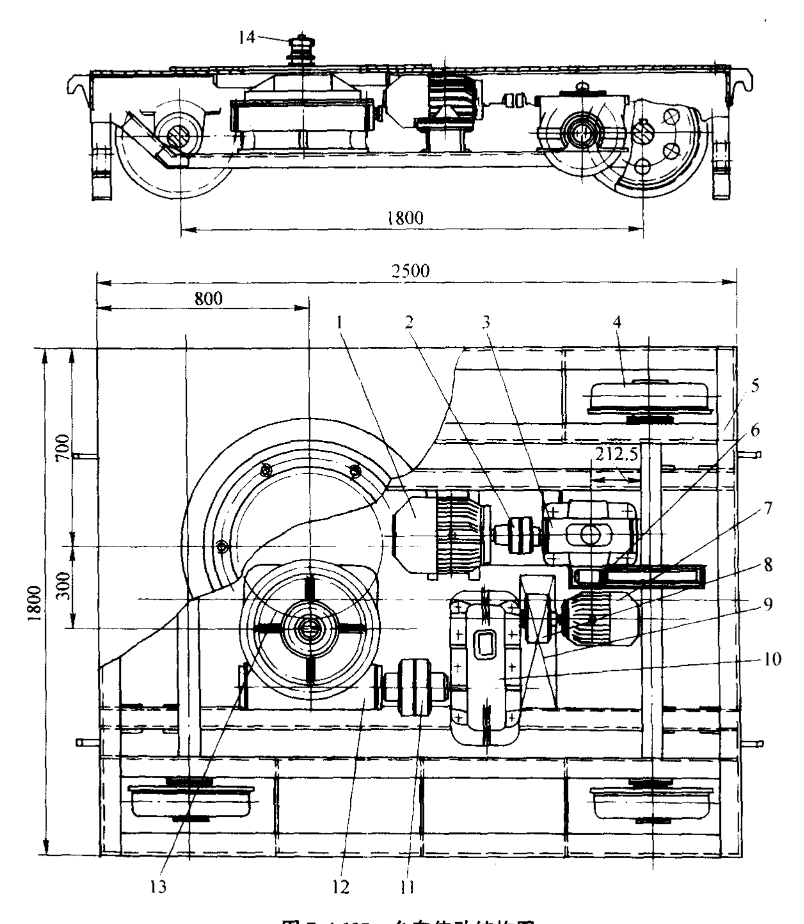


图 7.4-105　台车传动结构图

1—台车行走电机；2—联轴器；3—蜗杆减速器；4—走轮；5—台车架；
6—开式齿轮副；7—立柱回转电机；8—带制动轮的弹性联轴器；9—电磁制动器；10—齿轮减速器；
11—联轴器；12—蜗杆减速器；13—齿圈；14—小齿轮

3）伸缩臂的进给　伸缩臂的进给运动多为直流电机驱动，近来也有用直流或交流伺服电动机驱动的。由于焊纵缝时，伸缩臂要以焊速进给，所以对其以焊速运行的平稳性要求较高。进给速度的波动要小于 5%，速度范围要覆盖所需焊速的上下限，一般在 6～90 m/h 之间，并且均匀可调。有的操作机还设有一挡空程速度，多在 180～240 m/h 之间，以提高作业效率。为了保证到位精度和运行安全，在进给系统中设有制动和行程保护装置。伸缩臂进给系统的传动形式主要有三种见表 7.4-31。

表 7.4-31　伸缩臂进给系统的传动形式

传动形式	驱动机构	性　能
摩擦传动	电动机减速后，驱动胶轮或钢轮，借助其与伸缩臂上的摩擦力，带动伸缩臂进给	运动平稳、速度均匀、超载时打滑，起安全保护作用。但在高速进给时，制动性能差，到位精度低
齿条传动	电动机减速后，通过齿轮驱动固定在伸缩臂上的齿条，带动伸缩臂进给（图 7.4-104）	运动平稳、速度均匀、传动精确，是采用最多的传动形式，但制造费用较高
链传动	电动机减速后，通过链轮驱动展开在伸缩臂上的链条，带动伸缩臂进给（图 7.4-104）	制造费用较低，运动平稳性不如前两者，但仍能满足工艺要求

4）台车运行　各种操作机的台车运行，多为电机单速驱动，行速在 120～360 m/h 之间不等，最高可达 600 m/h。通常门式操作机行速较慢，平台式操作机行速较快。运行系统中均设有制动装置，台车与轨道之间设有夹轨器。门式操作机是双边驱动的，并设有同步保护装置。单速运行的台车，多用交流电动机驱动；变速运行的台车，现在已多用交流变频驱动。

伸缩臂式操作机的台车传动机构见图 7.4-105。

3.5.3　承载结构及其设计要求

门式操作机的门架多为桁架或板焊结构，平台式操作机以桁架结构为多，伸缩臂式操作机的立柱，主要是大径管柱或箱形、Π 形板结构，由于立柱是主要承载结构，除强度外要有很好的刚度和稳定性，因此，有些伸缩臂式操作机还采用双立柱结构（图 7.4-103）。若立柱是焊接结构，焊后应退火消除内应力。此外在立柱导轨处应机械加工，以保证滑鞍平稳升降所需的垂直度和平行度。

伸缩臂要有很好的刚度，要质量轻、形位精度高，在运行时不颤抖，在全伸状态下，端头下挠应控制在 2 mm 以内，否则，应设高度跟踪装置。伸缩臂多采用薄壁空腹冲焊整体结构。

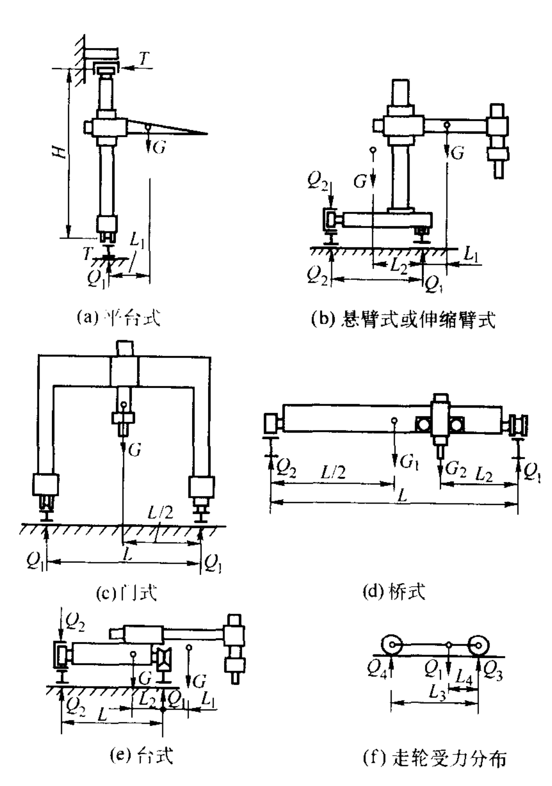
过去对伸缩行程较大的操作机，采用多节式的伸缩臂，现在行程长达 8 m 的操作机也采用整体结构，以保证伸缩臂的整体刚性和运行的平稳性。另外，应在伸缩臂的两端，一端安装焊接机头，另一端安装焊丝盘和焊剂输送回收等装置，尽可能使两端设备的自重不要悬殊过大。



台车是操作机的基础，要有足够的强度。车架要采用板焊结构，整体高度要小，要尽量降低离地间隙。行走轮的高度要可调，装配时要保证四轮着地。台车上应放置焊接电源等重物以降低重心，增加运行稳定性并防止整机倾覆。

3.5.4　焊接操作机的设计计算

焊接操作机的结构形式除 3.5.1 节中介绍的四种常用形式外，还有桥式（图 7.4-106d）和悬臂式（图 7.4-106b），即横臂不能伸缩）等操作机，现将它们的设计计算一并予以介绍。



(a) 平台式　(b) 悬臂式或伸缩臂式　(c) 门式　(d) 桥式　(e) 台式　(f) 走轮受力分布

图 7.4-106　操作机受力状态

各式操作机的受力状态见图 7.4-106 所示，其中，手台式、伸缩臂式和台式操作机应以满载质量，且伸臂在最大伸出长度，焊接小车或机头处在最端头时的重心位置进行计算。门式和桥式操作机在计算横梁结构时，应以居中的重心位置进行计算。

（1）行走机构计算

如图 7.4-106，各式操作机走轮上的支反力按表 7.4-32 所示公式计算。支反力算出后，按机械零件设计方法，算出走轮轴径。

1）走轮轮缘接触应力的计算　点接触（图 7.4-107b、e）时

$$\sigma_c = KK_f\sqrt[3]{\frac{PE^2}{R_1^2}} \leqslant [\sigma_c]$$

线接触（图 7.4-107a、c、d）时

$$\sigma_c = 0.167K_f\sqrt{\frac{PE}{hr_1}} \leqslant [\sigma_c]$$

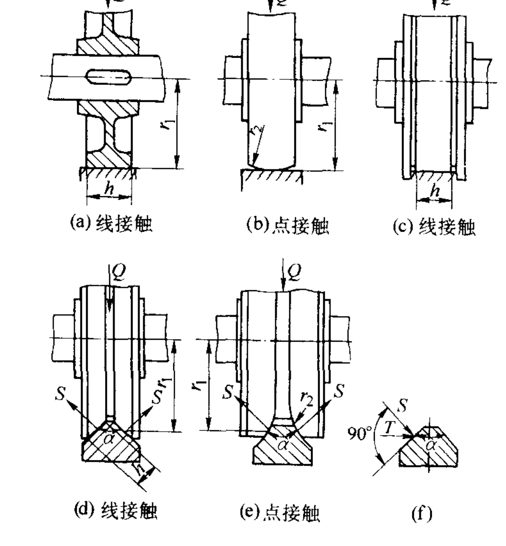
式中，K 为系数，根据 $\frac{R_2}{R_1}$ 由表 7.4-33 选取，其中 R_1 为 r_1 和 r_2 中的大值，R_2 为 r_1 和 r_2 中的小值（图 7.4-107）；K_f 为考虑切向摩擦力影响的因数，中级工作制时 $K_f = 1.05$；重级工作制时 $K_f = 1.10$；E 为综合弹性模量，$E = \frac{2E_1E_2}{E_1+E_2}$，其中 E_1、E_2 分别为轮缘与导轨材料的弹性模量；P 为作用在车轮上的计算载荷。平面导轨时 $P = K_HQ$，V 形导轨时 $P = K_H\left(\frac{Q}{2\sin\frac{\alpha}{2}} + T\cos\frac{\alpha}{2}\right)$，其中 Q 为作用在每个走轮上的载荷；α 为导轨楔角；K_H 为沿轨宽的载荷分布不均匀系数，点接触时 $K_H = 1.1$，线接触时 $K_H = 1.2$；T 为作用在 V 形导轨上的水平载荷（图 7.4-107f）；$[\sigma_c]$ 为许用接触应力。当操作机寿命为 10 年并以中级工作制工作时，$[\sigma_c]$ = 1.5 ~ 2HBS（MPa），HBS 为轮缘表面的布氏硬度，对于圆锥体轮缘应大于 240HBS。

表 7.4-32　各式操作机走轮支反力计算公式
（参见图 7.4-106）

结构形式 \ 支反力/N	T	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
平台式	$\frac{GL_1}{H}$	G	0	$\frac{Q_1(L_3-L_4)}{L_3}$	$\frac{Q_1L_4}{L_3}$
悬臂式	0	重心在实线位置 $G(L+L_1)/L$ 重心在虚线位置 $G(L-L_2)/L$	重心在实线位置 GL_1/L 重心在虚线位置 GL_2/L		
伸缩臂式	0				
台式	0				
门式	0	$0.5G$	0		
桥式	0	$\frac{G_1}{2} + G_2\frac{L-L_{2min}}{L}$	$\frac{G_1}{2} + G_2\frac{L_{2max}}{L}$		

表 7.4-33　接触系数

R_2/R_1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
K	0.28	0.19	0.145	0.13	0.119	0.111	0.105	0.099	0.095	0.09



(a) 线接触　(b) 点接触　(c) 线接触　(d) 线接触　(e) 点接触　(f)

图 7.4-107　走轮与导轨的接触形式

2）操作机行走阻力的计算

$$W_T = \sum_{i=1}^{n} K_pQ\frac{fd_B + 2\mu}{D_k}$$

式中，Q 为作用在每个走轮上的载荷；f 为走轮轴承的摩擦因数，滑动轴承 $f = 0.1$，滚珠轴承 $f = 0.015$，圆锥滚子轴承 $f = 0.02$；μ 为走轮与导轨的滚动摩擦因数，当轮径为 200 ~ 300 mm 时，圆柱面钢轮 $\mu = 0.03$ cm，球面钢轮 $\mu = 0.04$ cm，当轮径为 400 ~ 500 mm 时，圆柱面钢轮 $\mu = 0.05$ cm，球面钢



轮 $\mu=0.06$ cm；D_k 为走轮直径；d_B 为走轮轴承处的轴径；K_p 为走轮与导轨侧面摩擦因数，或双圆锥形走轮与导轨由于圆锥表面直径误差而引起附加摩擦力的因数，一般 $K_p=2.5$；n 为走轮个数。

3）操作机加速运动时的阻力计算

$$W'_T=W_T+Ga$$

式中，a 为加速度，m/s²；G 为整机质量，kg。

4）操作机行走电动机驱动力矩的计算

$$M=W_T\frac{D_k}{2\eta i}$$

式中，η 为电动机至走轮轴的总传动效率；i 为电动机至走轮轴的总减速比。

5）验算车轮与导轨间不打滑的条件

$$\frac{\varphi Q'_{min}}{W_T}\geqslant 2$$

式中，φ 为走轮与导轨的附着系数，钢轮时 $\varphi=0.15$；Q'_{min} 为对导轨的最小总压力，对V形轨，$Q'_{min}=\sum\frac{Q_{min}}{\sin\frac{\alpha}{2}}$，其中 Q_{min} 为作用在每个主动轮上的最小载荷；α 为导轨楔角（图7.4-107）。

（2）升降机构计算（参见图7.4-108）

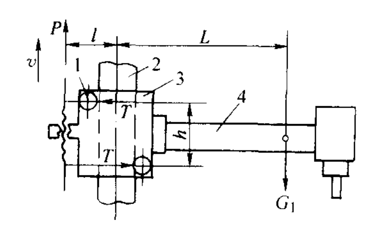


图7.4-108 操作机升降机构受力状态

1—滚轮；2—立柱；3—滑鞍；4—伸缩臂

① 提升力的计算 滑鞍与立柱之间用滚轮接触时

$$P=G_1\left[1+\frac{2K_p(L+l)(f_pd+2\mu)}{hD_p}\right]$$

用滑套接触时

$$P=G_1\left[1+\frac{2(L+l)}{h}f_c\right]$$

式中，G_1 为提升总重；f_p 为滚轮轴承摩擦因数；K_p 为滚轮侧缘或V形导轨上的摩擦损失系数，$K_p=1.5\sim2$；μ 为滚动摩擦因数；D_p 为滚轮直径；d 为滚轮轴径；f_c 为滑套与立柱的滑动摩擦因数，$f_c=0.1$。

② 验算伸缩臂外伸至极点而滑套与立柱间不发涩的条件

$$\frac{h}{L+l}>2f_cK_a$$

式中，K_a 为安全系数，$K_a=1.1$。

③ 提升机构的功率

$$N=\frac{Pv}{60\,000\eta}\ (\text{kW})$$

式中，P 为提升力，N；v 为提升速度，m/min；η 为提升机构总传动效率。

（3）伸缩机构计算（参见图7.4-109）

① 伸缩阻力的计算

滚动摩擦时

$$W_s=G_2K_p\frac{(2L_1+L_2)(f_pd+2\mu)}{L_2D_p}$$

滑动摩擦时

$$W_s=G_2\frac{2L_1+L_2}{L_2}f_c$$

式中，f_c 为伸缩臂与导轨之间的滑动摩擦因数。

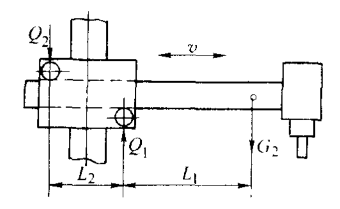


图7.4-109 操作机伸缩机构的受力状态

② 伸缩机构功率的计算

$$N=\frac{W_sv}{60\,000\eta}\ (\text{kW})$$

式中，W_s 为伸缩阻力，N；v 为伸缩速度，m/min；η 为伸缩机构总传动效率。

（4）承载结构计算

焊接操作机的承载结构有行走台车、立柱、平台、大梁、伸缩臂等，对它们不仅有强度要求，而且有刚度要求。

图7.4-110为伸缩臂式操作机承载图，设计这种操作机时，其结构刚度首先要保证因弹性变形引起的焊丝末端 K 在垂直和水平方向的位移 Δ_1 与 Δ_2 在焊接工艺允许的范围内。此称第一刚度条件。另外，从结构本身的形状、尺寸精度出发，要求垂直和水平挠度限定在一定范围之内，此称第二刚度条件。

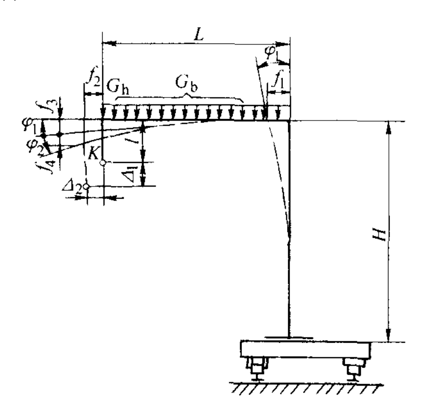


图7.4-110 伸缩臂式操作机承载图

① 伸缩臂或立柱上的最大弯矩的计算

$$M_w=(G_h+0.5G_b)L$$

式中，G_h 为焊接机具的质量；G_b 为伸缩臂的自重。

② 伸缩臂或立柱的最大弯曲应力的计算

$$\sigma=\frac{(G_h+0.5G_b)L}{W_{bs}}$$

式中，W_{bs} 为伸缩臂或立柱的抗弯截面系数。

③ 伸缩臂和立柱的刚度计算（参见图7.4-110）

$$f_1=\frac{M_wH^2}{2EJ_z}=\frac{(G_h+0.5G_b)LH^2}{2EJ_z}$$

$$f_2=f_1$$

$$\phi_1=\frac{M_wH}{EJ_z}=\frac{(G_h+0.5G_b)LH}{EJ_z}$$

$$f_3=\phi_1L=\frac{(G_h+0.5G_b)L^2H}{EJ_z}$$

$$\phi_2=\frac{G_hL^2}{2EJ_b}+\frac{G_bL^2}{6EJ_b}=\left(G_h+\frac{G_b}{3}\right)\frac{L^2}{2EJ_b}$$

$$f_4=\frac{G_hL^3}{3EJ_b}+\frac{G_bL^3}{8EJ_b}=\left(\frac{G_h}{3}+\frac{G_b}{8}\right)\frac{L^3}{EJ_b}$$



式中，E 为伸缩臂或立柱的弹性模量；J_z 为立柱的惯性矩；J_b 为伸缩臂的惯性矩。

④ 焊丝末端垂直位移和水平位移计算（见图 7.4-110）

垂直位移

$$\Delta_1 = f_3 + f_4 = (G_h + 0.5G_b)\frac{L^2 H}{EJ_z} + \left(\frac{G_h}{3} + \frac{G_b}{8}\right)\frac{L^3}{EJ_b}$$

水平位移

$$\Delta_2 = f_2 - l(\phi_1 + \phi_2) = \frac{(G_h + 0.5G_b)LH^2}{2EJ_z} - \frac{(G_h + 0.5G_b)LHl}{EJ_z} - \left(G_h + \frac{G_b}{3}\right)\frac{L^2 l}{2EJ_b}$$

式中，l 为焊接机头在伸缩臂上的安装点至焊丝末端的距离。

根据第一刚度条件

$$\Delta_1 \leqslant [\Delta_1] \qquad \Delta_2 \leqslant [\Delta_2]$$

式中，$[\Delta_1]$、$[\Delta_2]$ 为焊接工艺允许的焊丝端头在垂直和水平方向的偏移量。

根据第二刚度条件

$$\Delta_1 \leqslant \frac{L+H}{2\,000} \qquad \Delta_2 \leqslant \frac{L+H}{3\,000}$$

对于台式操作机（图 7.4-106e）或一端有焊接机头另一端固定的悬臂架，其 $H=0$，焊条末端的垂直和水平位移分别是

$$\Delta_1 = f_4 = \left(\frac{G_h}{3} + \frac{G_b}{8}\right)\frac{L^3}{EJ_b}$$

$$\Delta_2 = \phi_2 L = \left(G_h + \frac{G_b}{3}\right)\frac{L^2 l}{2EJ_b} \quad \text{（向内偏移）}$$

根据第一刚度条件

$$\Delta_1 \leqslant [\Delta_1] \qquad \Delta_2 \leqslant [\Delta_2]$$

根据第二刚度条件

$$\Delta_1 \leqslant \frac{L}{1\,500} \qquad \Delta_2 \leqslant \frac{L}{2\,500}$$

对于桥式操作机（图 7.4-106d）大梁和载有焊接小车的简支梁的最大挠度（下挠）

$$f_5 = \frac{G_h L_b^3}{48EJ_b} + \frac{5}{384}\frac{G_b L_b^3}{EJ_b} = (0.012G_h + 0.013G_b)\frac{L_b^3}{EJ_b}$$

式中，L_b 为大梁两支点间的距离，即图 7.4-106d 中的 L；G_h 为焊接机头等移行部分的总重，即图 7.4-106d 的 G_2；G_b 为大梁自重，即图 7.4-106d 中的 G_1；E 为金属材料的弹性模量；J_b 为大梁截面（多为箱形）的惯性矩。

在这种操作机上，焊接机头是偏置的（图 7.4-111），在 G_h 的作用下，大梁的扭转角

$$\alpha_n = \frac{G_h esL_b}{16F^2 G_c t}$$

式中，e 为偏心距；s 为截面板厚中线的总长；F 为截面板厚中线围成的面积；G_c 为钢的切变模量 $G_c = 80$ GPa；t 为截面板厚。

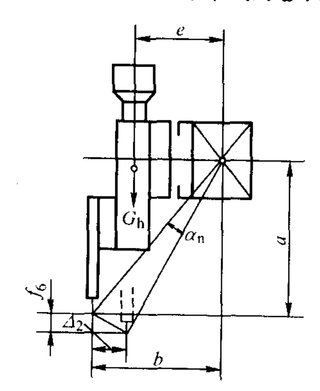


图 7.4-111　焊接机头偏置时的分析

此时桥式操作机或载有焊接小车的简支梁其焊条末端的垂直位移（图 7.4-111）

$$\Delta_1 = f_5 + f_6 = f_5 + b\alpha_n = (0.012G_h + 0.013G_b)\frac{L_b^3}{EJ_b} + \frac{bG_h esL_b}{16F^2 G_c t}$$

水平位移

$$\Delta_2 = a\alpha_n = \frac{aG_h esL_b}{16F^2 G_c t}$$

同理，根据第一刚度条件

$$\Delta_1 \leqslant [\Delta_1] \qquad \Delta_2 \leqslant [\Delta_2]$$

根据第二刚度条件

$$\Delta_1 \leqslant \frac{L_b}{2\,000} \qquad \Delta_2 \leqslant 3 \text{ mm}$$

对于悬臂式或伸缩臂式操作机，若焊接机头的重心偏离臂部截面中心线（图 7.4-111），则臂的扭转角

$$\alpha_n = \frac{G_h esL}{4F^2 G_c t}$$

式中，L 为臂的外伸最大长度，见图 7.4-110。

此时焊丝末端的垂直位移

$$\Delta_1 = f_4 + b\alpha_n = \left(\frac{G_h}{3} + \frac{G_b}{8}\right)\frac{L^3}{EJ_b} + \frac{bG_h esL}{4F^2 G_c t}$$

水平位移

$$\Delta_2 = a\alpha_n = \frac{aG_h esL}{4F^2 G_c t}$$

同理，根据第一刚度条件

$$\Delta_1 \leqslant [\Delta_1] \qquad \Delta_2 \leqslant [\Delta_2]$$

根据第二刚度条件

$$\Delta_1 \leqslant \frac{1}{1\,500} \qquad \Delta_2 \leqslant \frac{L}{2\,500} \leqslant 3 \text{ mm}$$

对用于精密焊接的操作机，在上述位移计算中，还应考虑增加操作力（一般约为 120 N）引起的位移和焊接机头安装间隙及自身弹性变形带来的位置误差。

3.5.5　焊接操作机的系列标准及选用

焊接操作机虽有多种结构形式，但伸缩臂式的焊接操作机以其机动性好、适应性强、应用范围广等优点，已成为焊接操作机中的主流产品。国内外有关焊接辅机制造厂，都以各自的系列批量生产，其结构和技术数据虽有差异，但主要功能基本是一致的。

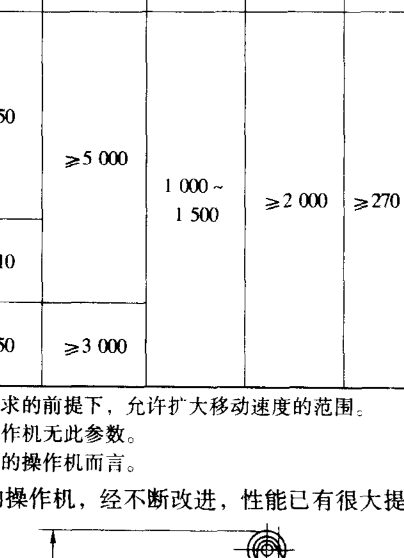
1993 年，我国针对广泛使用的伸缩臂式焊接操作机制定了行业标准（JB/T 6965—1993）。标准中将该类操作机分为立柱横臂固定式（即伸臂固定，焊接机头可在伸臂上移行）、立柱固定而横臂可调式（即焊接机头安装在伸臂的一端，伸臂可以伸缩）、立柱可移（即立柱在台车上，可移行）横臂固定式和立柱可移横臂可调式四种类型，并规定了它们的相关基本参数（表 7.4-34）。

标准中要求，焊接过程通过横臂或机头的移动来实现时，均应做到无级调速，且在网路电压波动 ±10%时，焊接速度的波动值不得超过 ±3%；横臂的回转角度应能控制，并有角度指示标志；横臂升降、伸缩、回转及立柱的移动等应有锁紧机构定位；伸臂外伸最大且锁紧时，其在水平面内的端点摆动量不得大于 ±0.5 mm，承载后其在垂直面内的端点下斜量不得大于 2 mm，否则焊接机头上应设高度跟踪装置。此外，标准还要求横臂及机头的移动应平稳，不得有爬行、抖动现象等。

上述基本参数和技术要求，厂家在设计制造时都应严格遵循；用户也可按此标准，作为选用操作机的依据。

表 7.4-34　焊接操作机的基本参数

（摘自 JB/T 6965—1993）



<table>
<tr><th>焊接机头沿横臂方向移动的最大距离 /mm</th><th>横臂沿立柱升降的最大距离 /mm</th><th>横臂沿立柱升降的最大速度 /mm·min⁻¹</th><th>立柱最大的空程速度 /mm·min⁻¹</th><th>横臂或机头移动速度范围[1] /mm·min⁻¹</th><th>横臂或机头最大空程速度[2] /mm·min⁻¹</th><th>横臂回转角度[3] /(°)</th></tr>
<tr><td>800</td><td>630</td><td rowspan="5">≥950</td><td rowspan="7">≥5 000</td><td rowspan="9">1 000 ~ 1 500</td><td rowspan="9">≥2 000</td><td rowspan="9">≥270</td></tr>
<tr><td>1 250</td><td>1 000</td></tr>
<tr><td>2 000</td><td>1 600</td></tr>
<tr><td>2 500</td><td>2 500</td></tr>
<tr><td>3 150</td><td>3 150</td></tr>
<tr><td>4 000</td><td>4 000</td><td rowspan="2">≥710</td></tr>
<tr><td>5 000</td><td>5 000</td></tr>
<tr><td>6 000</td><td>6 000</td><td rowspan="2">≥450</td><td rowspan="2">≥3 000</td></tr>
<tr><td>8 000</td><td>8 000</td></tr>
</table>

① 满足本标准要求的前提下，允许扩大移动速度的范围。
② 立柱固定式操作机无此参数。
③ 对横臂可回转的操作机而言。

我国现在生产的操作机，经不断改进，性能已有很大提高，除大型的以外，完全可以满足焊接生产的需要，应予优先选用。其技术数据见有关产品样本。

用户在选用订购焊接操作机时，除以操作机的行业标准作为选用依据外，还应注意以下几点。

① 操作机的作业空间，应满足焊接生产的需要。

② 对伸缩臂式的操作机，其臂的升降和伸缩运动是必需的，但是否需要立柱回转和台车行走，要视需要而定。

③ 是否向厂家提出可搭载其他作业机头的要求，要视生产需要而定。例如，对应用于埋弧焊的操作机，可提出搭载窄间隙焊、气保焊、碳弧气刨、打磨等作业机头以实现相应作业的要求。

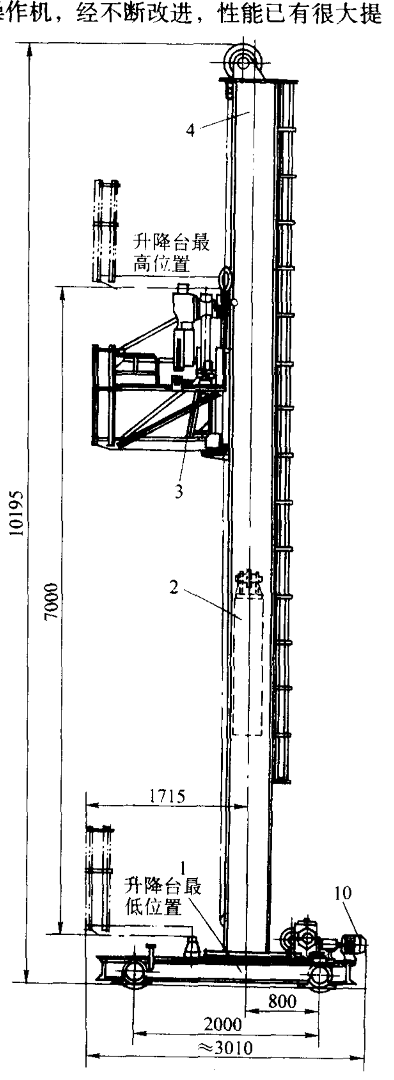
④ 施焊时，若要求操作机与焊件变位设备协调动作，则对操作机的几个运动，要提出运动精度和到位精度的要求。操作机上应有和焊件变位设备联控的接口。

⑤ 用于焊接小筒径内环缝、内纵缝的操作机，因属盲焊作业，要有外界监控设施。

⑥ 操作机伸缩臂运动的平稳性以及臂最大伸出时端头下挠度的大小，是操作机性能好坏的主要指标，选购时应予重视。

3.6　电渣焊立架

电渣焊立架（图 7.4-112）主要是将电渣焊机以所需的



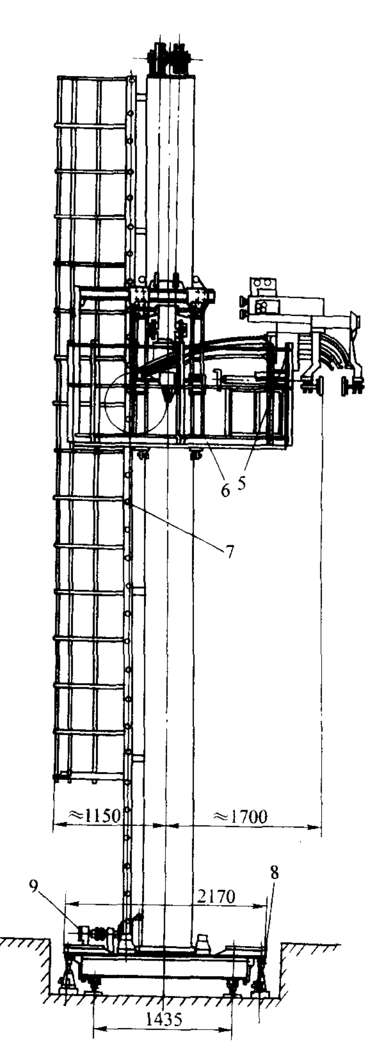


图 7.4-112　电渣焊立架

1—行走台车；2—升降平衡重；3—焊机调节装置；4—焊机升降立柱；5—电渣焊机；6—焊工、焊机升降台；7—扶梯；8—调节螺旋千斤顶；9—起升机构；10—运行机构



速度进行升降的焊机变位设备。它主要用于立缝的电渣焊，若与焊接滚轮架配合，也可用于环缝的电渣焊。

电渣焊立架多为板焊结构或桁架结构，一般都安装在行走台车上。台车由电动机驱动，单速运行，可根据施焊要求，随时调整与焊件之间的位置。

桁架结构的电渣焊立架由于质量较轻，因此，也常采用手驱动使立架移行。

电渣焊机头的升降运动，多采用直流电动机驱动，无级调速。为保证焊接质量，要求电渣焊机头，在施焊过程中始终对准焊缝，因此在施焊前，要调整焊机升降立柱的位置，使其与立缝平行。调整方式多样，有的采用台车下方的四个千斤顶进行调整（图7.4-112）；有的采用立柱上下两端的球面铰支座进行调整。在施焊时，还可借助焊机上的调节装置随时进行细调。

有的电渣焊立架，还将工作台与焊机的升降做成两个相对独立的系统，工作台可快速升降，焊机则由自身的电动机驱动，通过齿轮－齿条机构，可沿导向立柱作多速升降。由于两者自成系统，可使焊机在施焊过程中不受工作台的干扰。

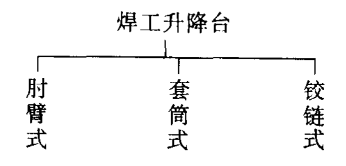
电渣焊立架，在国内外均无定型产品生产，我国企业使用的都是自行设计制造的。图7.4-112所示是国内一金属结构厂使用的电渣焊立架结构图，其技术数据如下。

焊件最大高度	7 000 mm
升降台行程	7 000 mm
升降台起升速度	
焊速运行	0.5～9.6 m/h
空程运行	50～80 m/h
升降台允许载荷	500 kg
升降电动机功率	0.7 kW（直流）
台车行走速度	180 m/h
行走电动机功率	1 kW

3.7 焊工升降台

焊工升降台是将焊工连同其施焊器材升降到所需高度，以利装焊作业的焊工变位设备。它主要用于高大焊件的手工和半机械化焊接，也用于装配作业和其他需要登高作业的场合。

焊工升降台按结构形式分，大致有三种形式（图7.4-113～图7.4-115）。



肘臂式焊工升降台又分为管结构（图7.4-113）和板结构（图7.4-116）两种，前者自重小，但焊接制造麻烦；后者自重较大，但焊接制造工艺简单，整体刚度好，是目前应

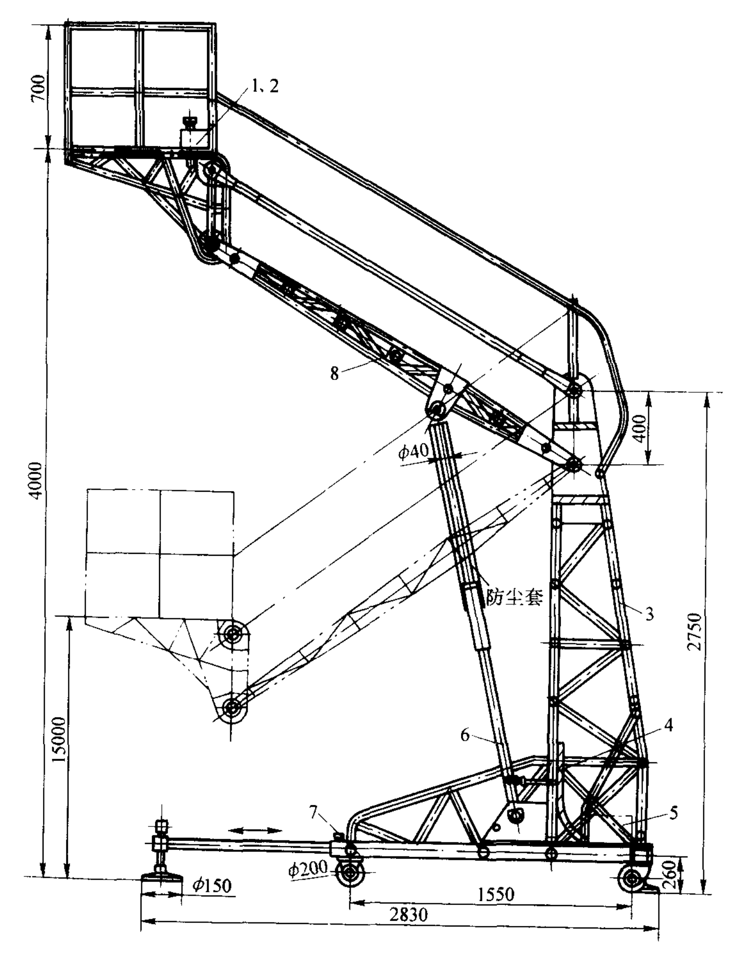


图7.4-113 肘臂式管结构焊工升降台

1—脚踏油泵；2—工作台；3—立架；4—油管；5—手摇油泵；6—液压缸；7—行走底座；8—转臂



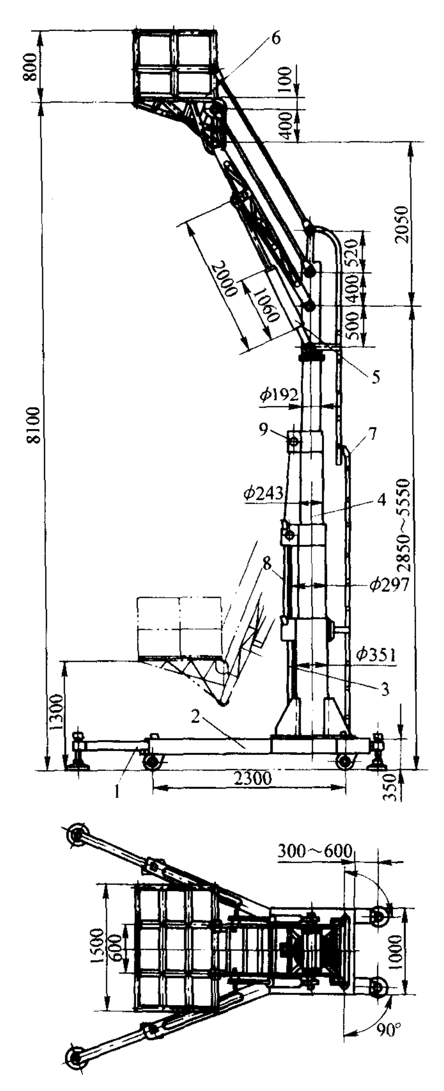


图 7.4-114　套筒式焊工升降台

1—可伸缩支撑座；2—行走底座；3—升降液压缸；4—升降套筒总成；5—工作台升降液压缸；6—工作台；7—扶梯；8—提升钢索（链条）；9—滑轮（链轮）

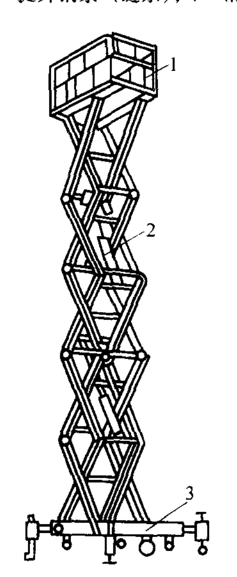


图 7.4-115　铰链式焊工升降台

1—工作台；2—推举液压缸；3—底座

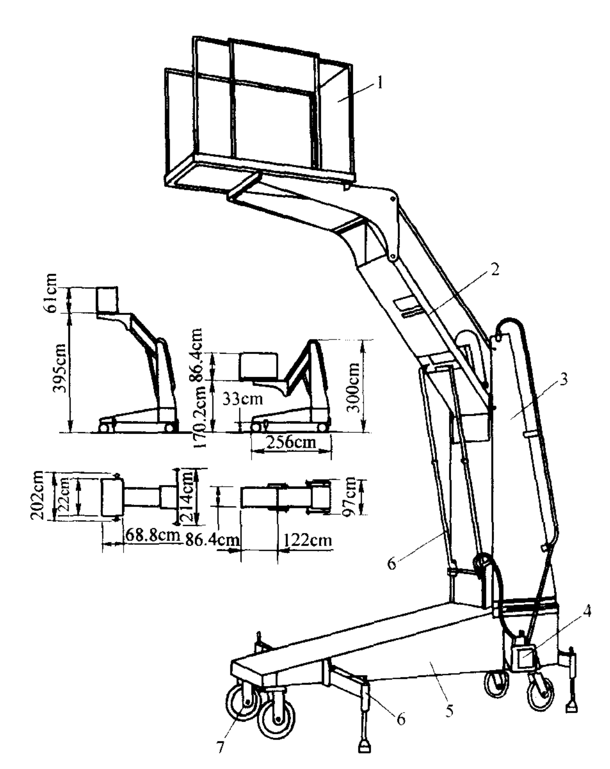


图 7.4-116　肘臂式板结构焊工升降台

1—工作台；2—转臂；3—立柱；4—手摇油泵；5—底座；6—撑脚；7—走轮

用较广的结构形式。

焊工升降台几乎都采用手动油泵驱动，其操纵系统一般有两套，一套在地面上操纵，粗调升降高度；一套在工作台上操纵，进行细调。

焊工升降台的载重量一般为 250 ~ 500 kg，工作台的最低高度为 1.2 ~ 1.7 m，最大高度为 4 ~ 8 m，台面有效工作面积为 1 ~ 3 m^2。焊工升降台的底座下方，均设有走轮，靠拖带移动。工作时利用撑脚承载。

焊工升降台油路系统要有很好的密封性，特别是液压缸前后油腔的密封，手动控制阀在中间位置的密封，都至关重要。为了保护焊工的人身安全，设计安全系数均在 5 以上，并在工作台上设置护栏，台面铺设木板或橡胶绝缘板，整体结构要有很好的刚性和稳定性，在最大载荷且工作台位于作业空间的任何位置时，升降台都不得发生颤抖和整体倾覆。

套筒式焊工升降台套筒部分的结构图及其升降原理图见图 7.4-117 所示。套筒的截面大多数是圆形的，但也有方形和矩形的。套筒的伸出，是举升液压缸推动一套钢索滑轮系统或链条链轮系统实现的，由原理图 7.4-117a 可知，若不计举升液压缸的倾角，则套筒顶部的行程是液压缸活塞伸出行程的 3 倍。

套筒式焊工升降台的液压系统见图 7.4-118 所示。

肘臂式的焊工升降台，国外有厂家专门生产，而且以板结构的居多。国内用户使用的，大都是自行设计制造的。现在我国已有厂家定型生产多用途的铰链式升降台和套筒式的垂直升降台以及用于飞机检修的升降工作台，这些升降工作台也可用来作为焊工升降台使用。

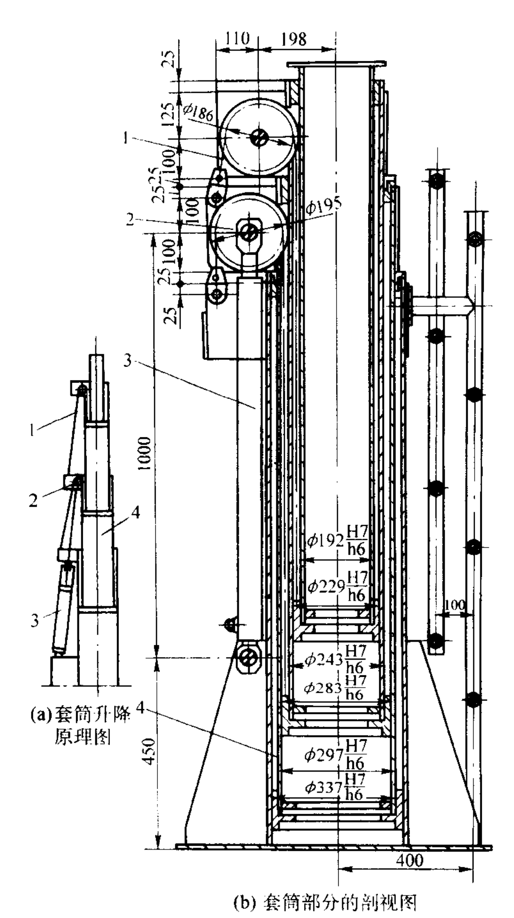


图 7.4-117 套筒式焊工升降台的部分结构

1—钢索链条；2—滑轮链轮；3—举升液压缸；4—套筒

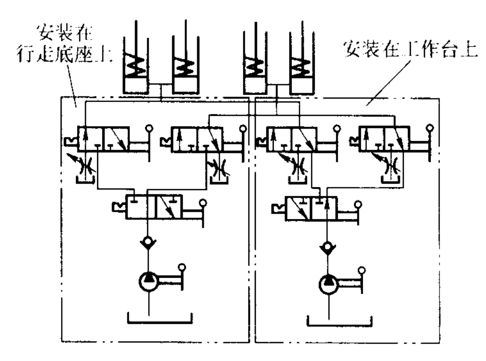


图 7.4-118 套筒式焊工升降台液压传动系统

4 焊接工序设备

4.1 设备用途及工艺目的

坡口的打磨、修整以及焊缝的清根、打磨、修整、碾压、击打和焊件的矫形、热处理、表面清理等，都是焊接工序中的工艺内容，其所用的设备和工艺目的见表 7.4-35。

焊接工序使用的设备绝大多数是通用的，国内外都有定型产品生产，使用时查阅相关文献进行选购即可。

4.2 部分焊接工序设备及机具的性能与参数

4.2.1 专用打磨机

如图 7.4-119 所示的打磨机主要用于筒体的外表面、外环缝、外纵缝以及短筒体内表面、内纵缝的打磨，其磨头上可安装砂轮、砂带和圆盘钢丝刷等三种磨具，如果安装上片

表 7.4-35 焊接工序使用设备及其工艺目的

设备名称	用　途	工艺目的
1）手提式砂轮机 2）专用打磨机 3）安装在操作机上的打磨机头 4）手提式气铲 5）气动除锈器 6）手提式气铣刀	修整焊缝，清理焊道和焊件表面，清除焊根	改善焊缝工作应力分布，减少应力集中，提高疲劳极限，增加承载能力 减少焊接缺陷，降低表面粗糙度，改进焊缝、焊件的外观质量
7）焊缝碾压机 8）焊缝锤打机 9）手提式气凿 10）手提式针束气枪	碾压或击打焊缝及其周边金属	密实焊缝组织，削减内应力峰值，增加压应力区，改善焊缝和近缝区的力学性能，提高接头承载能力
11）热矫设备（由氧－乙炔焰加热枪、千斤顶、拉紧器等组成） 12）冷矫设备（立、卧式压床，辊床等）	焊件矫形	得到所需的几何形状和尺寸
13）热加工退火炉 14）红外线局部加热器	降低或消除焊接内应力，改善焊缝组织与性能，防止产生裂纹	稳定焊件的几何形状和尺寸，提高承载能力，满足使用要求

状成形砂轮，还可以打磨坡口，清理焊根。全机以压缩空气为动力源，通过气动马达驱动磨头 1 旋转，用倾斜气缸推动倾斜装置使磨头 1 贴向焊件表面，用水平位移气缸推动滑座在机座上滑动，另外，整个打磨机构可绕垂直轴回转，打磨时磨头附近还有以压缩空气为动力的吸尘装置。

专用打磨机，国内未见生产，国外有厂家生产，其技术数据如下：

许用筒体最小内径　400 mm
磨头水平行程　900 mm、1 650 mm、2 100 mm
磨头水平移行速度　50 ~ 5 000 mm/min
压缩空气压力　0.5 MPa
磨具尺寸
　砂轮　10 ~ 30 mm × ϕ200 mm
　圆盘刷　10 ~ 30 mm × ϕ200 mm
　砂带宽度　8 ~ 100 mm
　气动马达功率　5.5 kW
　磨头垂直行程　300 mm
　砂带振幅　± 5 mm
　许用焊件最高温度　350℃

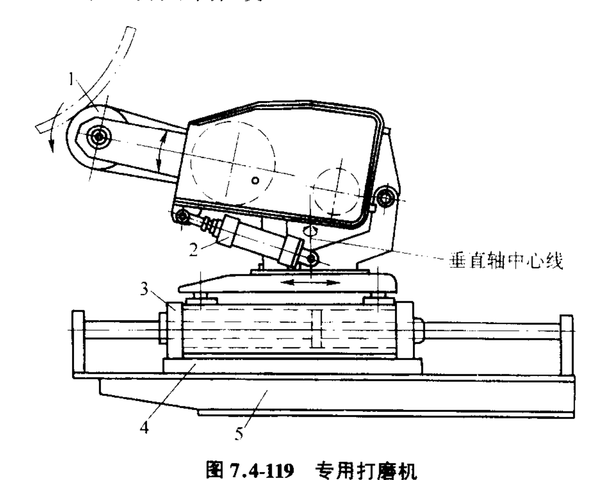


图 7.4-119 专用打磨机

1—磨头；2—倾斜气缸；3—水平位移气缸；4—滑座；5—机座

使用电源

电压 220/380 V

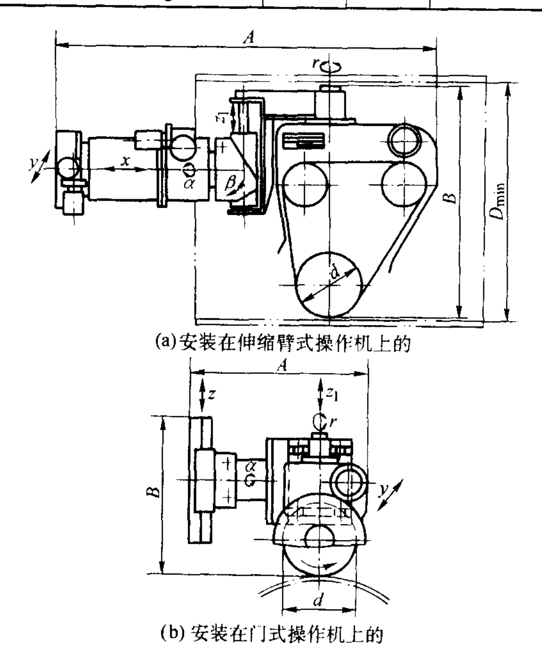
频率 50 Hz

4.2.2 安装在操作机上的打磨机头

图 7.4-120a、b 分别为安装在伸缩臂式和门式操作机上的打磨机头，其工作原理与专用打磨机相同，主要用于大型焊件的打磨加工。意大利 ANSALDO 公司生产打磨机头的技术数据见表 7.4-36（参见图 7.4-120）

表 7.4-36 打磨机头的技术数据

名称 \ 型号		用于伸缩臂操作机		用于门式操作机
		MIU600	MU1200	PMU20
许用筒体内径	D_{min}/mm	600	1 200	
左右水平位移	X/mm	±50	±73	0
前后水平位移	Y/mm	±40	±75	±73
垂直位移	Z_1/mm	80	200	200
	Z/mm	0	0	700
磨头转角	α/(°)	−25～90		90～−25
	β/(°)	0	−5～30	0
	γ/(°)	−5、+15、+85、+105 四个位置		
砂轮圆盘钢丝刷直径	d/mm	300	600	600
砂轮	厚度/mm	8～20		
圆盘钢丝刷	厚度/mm	10～20		
砂带	长度/mm	1 720		
	宽度/mm	80～100		
工作气压/MPa		0.4～0.6		
平均耗气量/$cm^3 \cdot min^{-1}$	砂轮	25	35～40	
	砂带	50	60	
许用工件温度/℃		400		
气动马达功率/kW		15	20	20
使用电源		380 V 50 Hz		
外廓尺寸/mm	A	1 624	1 895	1 400
	B	580	1 160	1 300
自重/kg		450	980	1 100



(a) 安装在伸缩臂式操作机上的

(b) 安装在门式操作机上的

图 7.4-120 操作机上使用的打磨机头

打磨机头，我国早有设计并作出样机，其结构及工作原理见相关文献，但是未能定型生产。直到 20 世纪 90 年代中期，国内焊接辅机制造厂在锅炉行业技术改造成套焊接工艺装备中推出了用于筒节外纵缝的打磨机头。其技术数据如下：

适用筒径 600～2 500 mm

适用筒节最大长度 2 000 mm

砂轮进给速度 0.17～1.7 m/min，无级调速

砂轮与焊件的接触应力 0～150 N/cm²

砂轮

转速 2 000 r/min

直径 250 mm

宽度 30 mm（打磨）

8 mm（清焊根）

安装在伸缩臂操作机上的打磨机头，我国也有引进，用来打磨大型焊件，效率很高。打磨作业由工人通过按钮操作，安全便捷。打磨机头上还安有磨屑回收装置，避免了对作业环境的污染。但是由于国产磨具使用寿命较短，限制了其作用的发挥。

4.2.3 手提式针束气枪和气动除锈器

针束气枪实际上是在铆钉枪的枪头上套入专用的钢丝束头，其钢丝由直径 1 mm、1.5 mm 或 2 mm，长度约 110 mm 的 65Mn 丝制作而成，并经热处理，硬度达 HRC48～50，有很高的韧度和硬度，用来冲敛焊缝和近缝区，使其表面强化并形成压应力区。针束气枪也可用来清除焊件表面的铁锈及其他脏物。

气动除锈器有冲击式、多头式、针束式、回转式等多种形式，主要用于清除焊件表面的锈层或漆层。

这些机具体积小、质量轻、机动性强、可达性好，特别适宜于凸凹不平表面的作业。

4.2.4 手提式气铲和气铣刀

气铲是装有铲头，以冲击方式清除焊件飞边、毛刺以及用于坡口和焊缝修整的气动工具。气铲上可装卡各种形状的铲头，使用灵活方便。

气铣刀是用于铣削金属材料的气动工具，配上不同类型硬质合金的铣刀，可用于焊件的光整加工和清除其上的飞边、毛刺等。

上述气动工具的技术数据参见文献。

5 焊接机器人用的焊件变位设备

焊接机器人虽然有 5～6 个自由度，其焊枪可到达作业范围内的任意点以所需的姿态对焊件施焊，但在实际作业中，对于一些结构复杂的焊件，如果不将其适时变换位置，就可能会和焊枪发生结构干涉，使焊枪无法沿设定的路径进行焊接。另外，为了保证焊接质量，提高生产效率，往往要把焊缝调整到接近水平、船形等最佳位置进行焊接，因此，也需要焊件适时地变换位置。基于上述两个原因，焊接机器人几乎都是配备了相应的焊件变位设备才实施焊接的，其中以翻转机、变位机和回转台为多，如图 7.4-121～图 7.4-123 所示。

5.1 焊件变位设备的运动精度及保证措施

与 3.2.2 节中的述及相同，各种焊件变位设备与焊接机器人之间的运动配合，均分为非同步协调和同步协调运动两种，前者采用点位控制，后者采用轨迹控制。点位控制的焊件变位设备，在机器人施焊时，焊件变位设备不运动，待机器人施焊终了时，焊件变位设备才根据指令动作，将焊件再调整到另一最佳位置，进行下一条焊缝的焊接，如此周而复始，直至将焊件上应焊的焊缝焊完。轨迹控制的焊件变位设



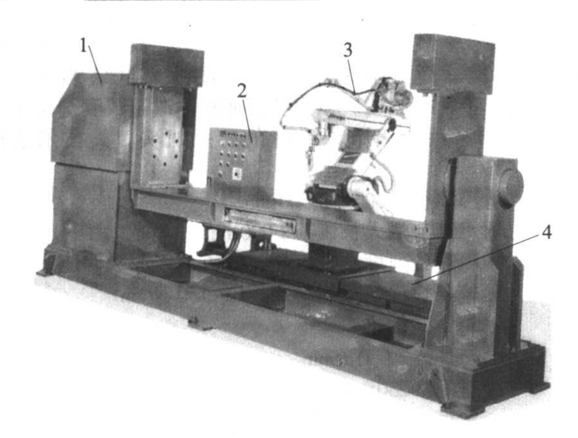


图 7.4-121　弧焊机器人与框架式焊接翻转机
1—框架式焊接翻机；2—控制柜；
3—弧焊机器人；4—机器人移行滑轨

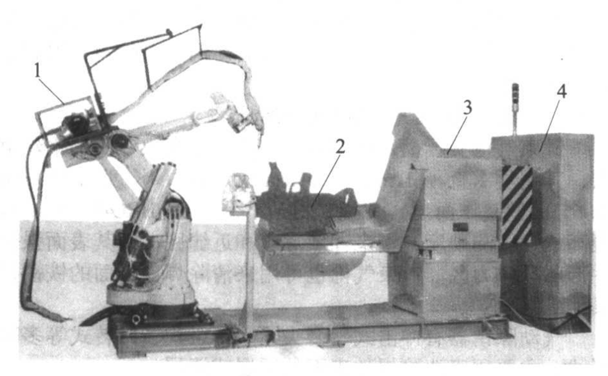


图 7.4-122　弧焊机器人与 L 型焊接变位机
1—弧焊机器人；2—焊件；3—L 型焊接变位机；4—控制柜

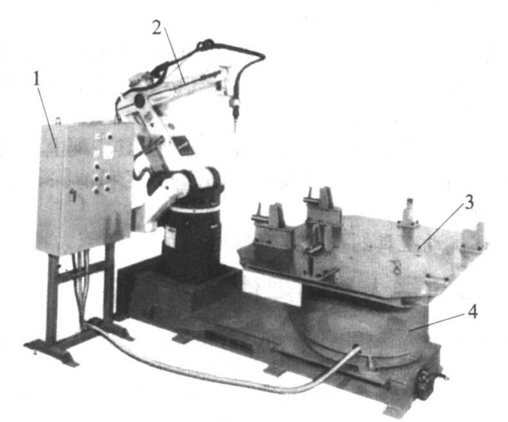


图 7.4-123　弧焊机器人与水平式焊接回转台
1—开关柜；2—弧焊机器人；3—夹具；4—焊接回转台

备，不仅具有非同步协调的功能，而且在机器人施焊时，焊件变位设备根据事先设定的程序，带着焊件作同步协调运动，将其上待焊的焊缝连续不断地调整到接近水平或船形的最佳位置进行焊接。对焊接机器人用的焊件变位设备来说，这两种协调运动要求的运动精度均高于普通的焊件变位设备，这也是其与普通焊件设备的主要区别。但是，对非同步协调运动的焊件变位设备仅要求高的到位精度；而对同步协调运动的，除要求高的到位精度外，还要求高的轨迹精度和速度平稳性精度。

点焊机器人使用的焊件变位设备，都是点位控制、非同步协调运动。弧焊机器人使用的焊件变位设备，除了焊接空间曲线焊缝和空间曲面堆焊的以外，焊件变位设备也都是点位控制、非同步协调运动。

焊件变位设备的工作台，多是作回转和倾斜运动。焊件随工作台运动时，其焊缝上产生的弧线误差不仅与回转和倾斜运动的转角误差有关，而且与焊缝微段距回转和倾斜中心的距离有关。焊缝距回转、倾斜中心越远，在同一转角误差下产生的弧线误差就越大。通常，机器人的到位精度多在 ±0.1 mm左右，与此相匹配，焊件变位设备的到位精度也应在此范围内。现以到位精度 0.1 mm 计，则距离回转、倾斜中心 500 mm 的焊缝，变位设备工作台的转角误差需控制在 0.01°以内；而相距 1 000 mm 的焊缝则需控制在 0.005°以内。因此，焊件越大，其上的焊缝离回转、倾斜中心越远，要求焊件变位设备的转角精度就越高。这无疑增加了制造和控制大型焊件变位设备的难度。轨迹精度（即瞬时到位精度）和速度平稳性精度也与焊缝微段距回转和倾斜中心的瞬时距离有关，为了和机器人的运动精度相匹配，焊件变位设备的轨迹精度一般控制在 ±0.1 mm 左右，速度平稳性精度控制在 ±5%以内。

为了保证焊件变位设备的运动精度，同时又要遵从经济性的原则，对用于非同步协调运动的焊件变位设备，因是点位控制，所以其传动系统和普通变位设备的相仿，恒速运动的采用交流电机驱动；变速运动的采用直流电机或交流电机变频驱动。但是为了精确定位，常采用带制动器的电动机，同时在传动链末端（工作台）设有行程开关和气动锥销强制定位机构，定位点可视需要，按每隔 30°、45°或 90°设置。

用于同步协调运动的焊件变设备，因为是轨迹控制，所以其传动系统的运动精度和控制精度是保证弧焊机器人实现其定位精度、轨迹精度和速度平稳性精度的关键。因此，在焊件变位设备中多采用交流伺服电动机驱动，闭环、半闭环数控。在传动机构上，采用精密传动副，并将其布置在传动链的末端。有的在传动系统中还采用了双蜗杆预紧式传动机构（图 7.4-124），以消除齿侧间隙对运动精度的影响。另外，为了提高控制精度，在控制系统中采用每转高脉冲数的编码器，通过其位置传感元件和计数基准零角度标定孔，使工作台的回转和倾斜与编码器发出的脉冲数联系在一起；为了提高对弧焊机器人焊枪运动的响应速度，要降低变位机的运动惯性，为此应尽量减小传动系统的质量和飞轮矩。

采用伺服驱动后，若选用输出转矩较大的伺服电动机，可使传动链大大缩短，传动机构进一步简化，有利于传动精度的提高；若采用闭环控制，对传动机构制造精度的要求相对半闭环控制的要低，并会获得较高的控制精度，但控制系统相对复杂，造价也高。

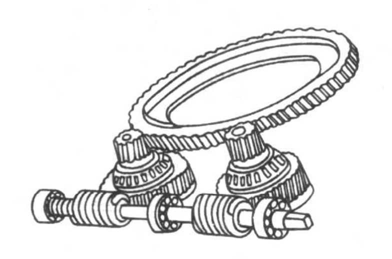


图 7.4-124　双蜗杆预紧式传动机构

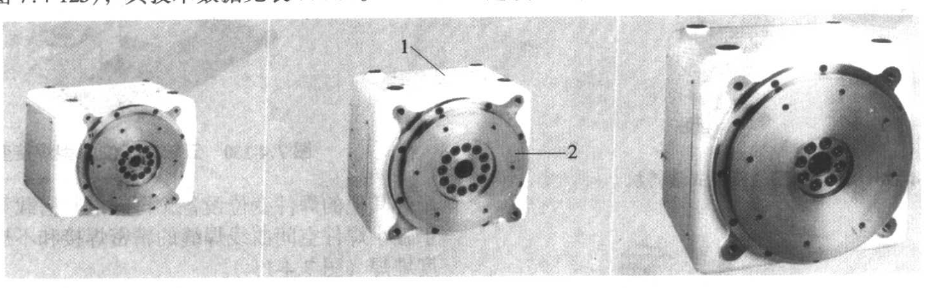
现在国外一些焊接机器人生产厂家，为了使焊件变位设备的性能与焊接机器人的性能相适应，相继开发出了这些变位设备的到位精度和轨迹精度对于单轴的焊件变位设备（图 7.4-121、图 7.4-123），在回转（倾斜）半径500 mm处的弧线误差大都控制在 ±0.1 ~ ±0.3 mm；对双轴的（图 7.4-122），则控制在 ±0.2 mm 左右，并采用统一的制式来控制二者的运动，与自产焊接机器人相配套的焊件变位设备一并提供给用户。

5.2 焊件变位设备及其在柔性加工单元中的布置

5.2.1 标准动力头组成的焊件变位设备

日本松下电气株氏会社开发了一种用在焊件变位设备上的标准动力头（图 7.4-125），其技术数据见表 7.4-37。

这种动力头有三种型号，每个型号动力头的箱体和回转接盘上都有连接用的内螺纹孔，螺纹孔的分布、间距、公称尺寸、螺孔深度都是统一的，用于箱体与箱体、箱体与底座、回转接盘与夹具、回转接盘与工作台或其他金属构件的连接。生产厂家只需根据用户的要求，利用此动力头并设计



(a) YA-IGJB11型　(b) YA-IGJB12型　(c) YA-IGJB31型

图 7.4-125 标准动力头

1—箱体；2—回转接盘

制作出底座和相应的金属构件，就可组装成各种形式的焊件变位设备，如图 7.4-126 ~ 图 7.4-130 所示。

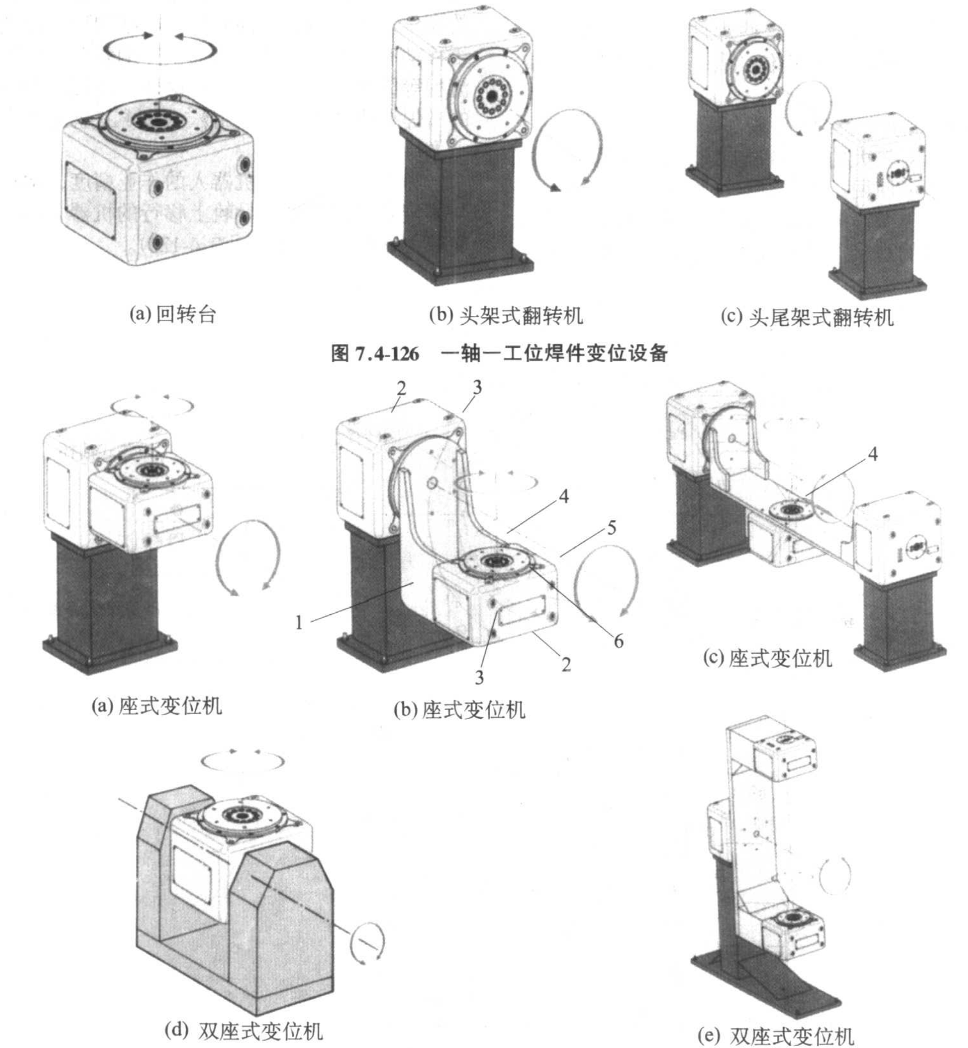
表 7.4-37 标准动力头技术数据

型　号	YA－IAJB11	YA－IAJB12	YA－IAJB31
许用载荷/kg	200	500	1 000
重复定位精度/mm	±0.1①		

① 回转半径为 500 mm 处的弧线误差。

5.2.2 安川电气公司的焊件变位设备

日本安川电气公司也为自己生产的弧焊机器人开发了三种焊件变位设备，图 7.4-131 为焊接回转台，图 7.4-132 为头架式的焊接翻转机，图 7.4-133 为焊接变位机，它们的技术



(a) 回转台　(b) 头架式翻转机　(c) 头尾架式翻转机

图 7.4-126 一轴一工位焊件变位设备

(a) 座式变位机　(b) 座式变位机　(c) 座式变位机　(d) 双座式变位机　(e) 双座式变位机

图 7.4-127 二轴一工位焊件变位设备

1—底座；2—箱体上的内螺纹孔；3—标准动力头；4—金属结构件；5—回转接盘；6—接盘上的内螺纹孔

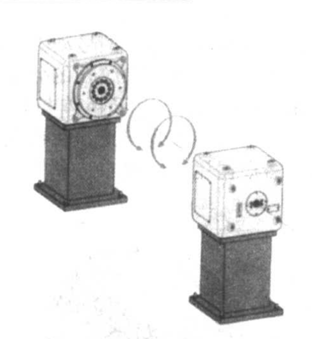
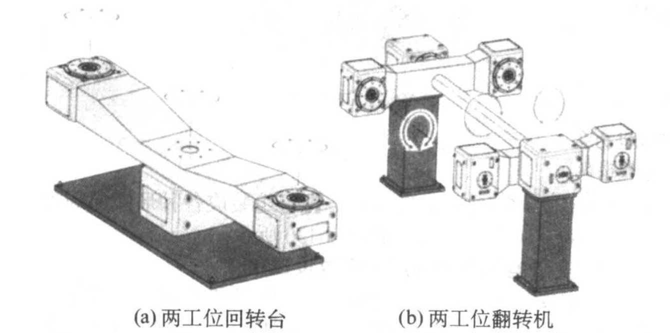


图 7.4-128 二轴二工位头架式翻转机



(a) 两工位回转台 (b) 两工位翻转机

图 7.4-129 三轴二工位焊件变位设备

数据分别见表 7.4-38 ~ 表 7.4-40。这些焊件变位设备，在它们的回转接盘上都有内螺纹孔和定位销孔，用于工作台或夹具的连接和定位。

5.2.3 工业机器人式的焊件变位设备

一些搭载重量相对较大的工业机器人，也可作为弧焊机器人的焊件变位设备来使用。由于其自由度一般都在四个以上，所以焊件上的每一微段焊缝在焊接的瞬间，都能实现真正意义上的最佳位置的焊接。但其成本，远高于弧焊机器人

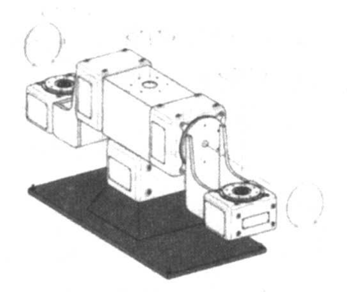


图 7.4-130 五轴二工位 L 型焊接变位机

用的其他的焊件变位设备，再加上其搭载重量有限，主要用于轻小焊件空间曲线焊缝的精密焊接和不规则空间曲面的精度堆焊（图 7.4-134）。

5.2.4 焊件变位设备在柔性加工单元中的布置

作为柔性加工单元，一般常配备一台焊接机器人，为了提高其利用率，除了将焊件变位设备做成双工位（图 7.4-128 ~ 图 7.4-130）和多工位的以外，也可将多台焊件变位设备布置在机器人的作业区以内（图 7.4-135）。对于一些用于长形焊件的变位设备，如果机器人能在导轨上移行，也可布置在机器人的两边（图 7.4-136）；如果机器人安装在移行式的操作机上，则焊件变位设备的布置就更加灵活，布置台数也会相应增多，从而形成机器人的焊接生产线或焊接生产面。至于焊件变位设备如何布置，布置几台，使用什么形式的变位设备，除和焊件的尺寸、结构形式以及焊接机器人是否移动有关外，还和产品的生产纲领、生产节拍、焊接工艺流程等因素有关。这方面的论述，请读者参阅林尚扬等编著的《焊接机器人及其应用》（机械工业出版社 2000 年出版）一书。

另外，为了保证机器人的作业精度，常将焊件变位设备与固定式机器人或在导轨上移行的机器人都布置在同一公共底座上（图 7.4-121 ~ 图 7.4-123）。

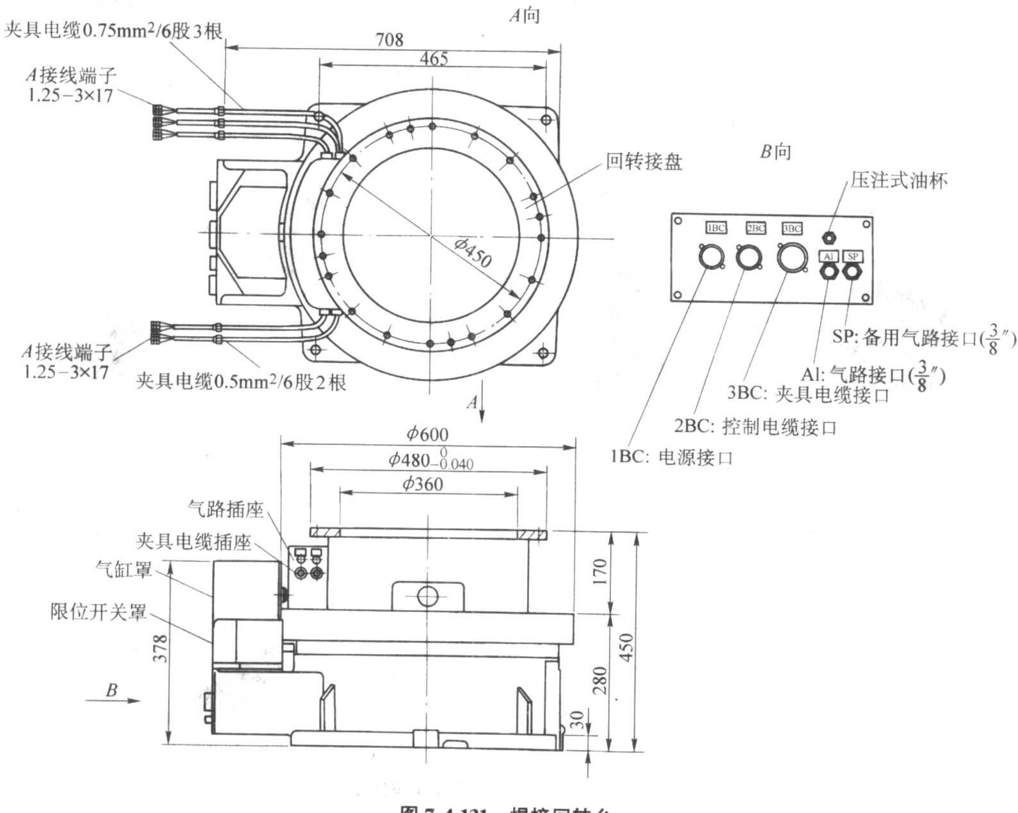


图 7.4-131 焊接回转台



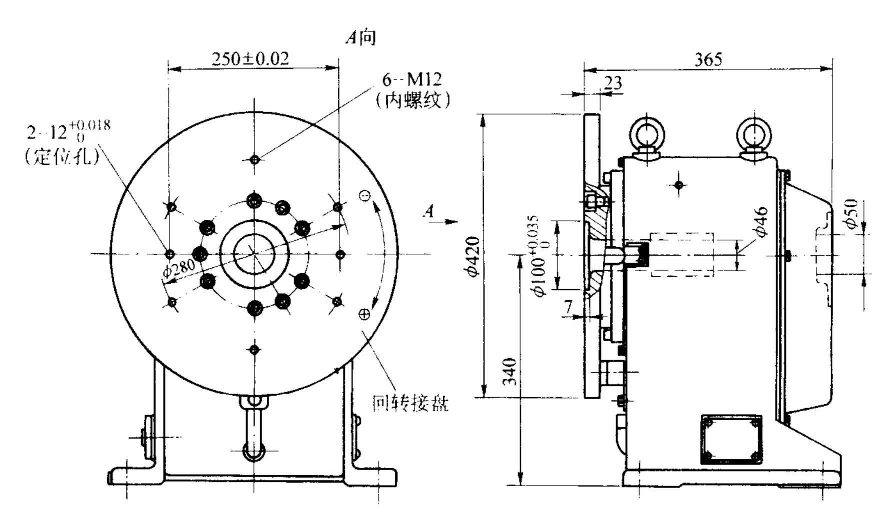


图 7.4-132　头架式翻转机

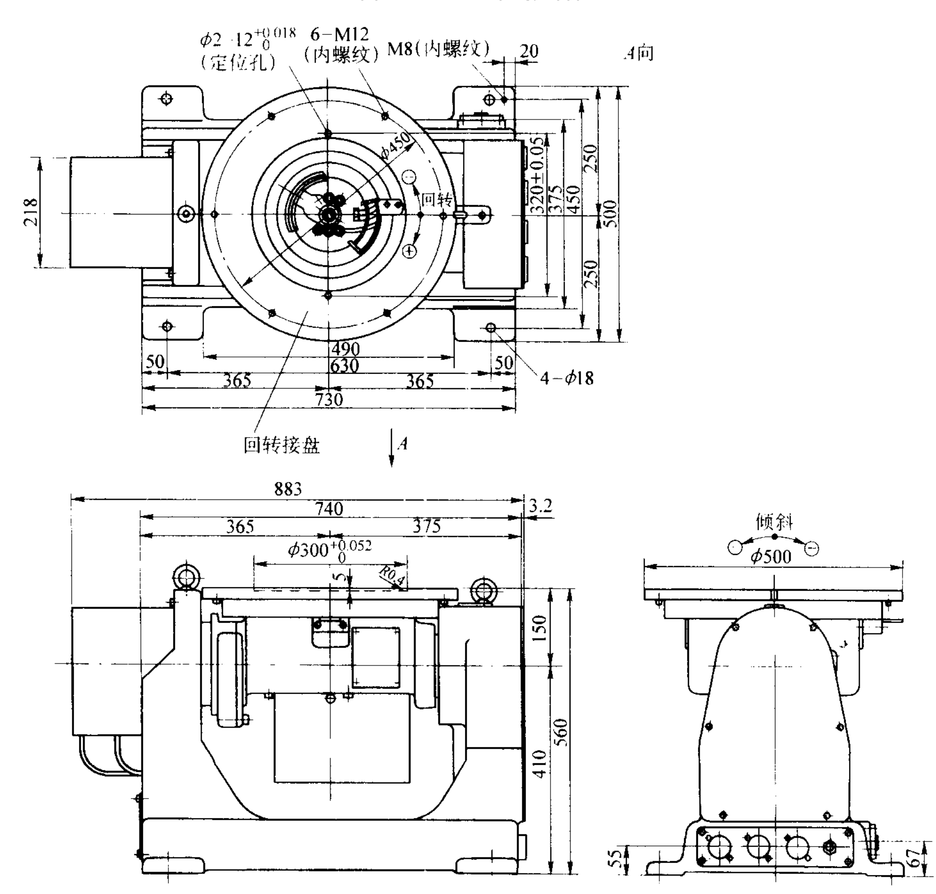


图 7.4-133　焊接变位机

表 7.4-38　MOTOPOS－T1000　回转台技术数据

许用载荷/kg	1 000	许用载荷/kg	1 000
类型	标准	驱动电机	伺服电机（SGMD－40AWYR13）
型号	YR－MPT200－A00	回转精度/mm	±0.3（1 000 直径）
许用转矩/N·m	4 900	适用控制器	YASNAC MRC，YASNAC XRC
许用转动惯量（$GD^2/4$）/kg·m^2	500	自重/kg	300
回转角/（°）	±100	内置 I/O 电缆	0.5 mm^2（线截面面积）×30 根
最大回转速度/（°）·s^{-1}	80（13.3 r/min）	内置输气管	3/8″×2 根

注：为了安全，锁定装置应该在±90°的位置安置。

表 7.4-39 MOTOPS－S200/S400 头架式翻转机技术数据

许用载荷/kg	200		400	
类型	标准	带旋转接盘	标准	带旋转接盘
型号	YR－MPS200－A00	YR－MPS200－B00	YR－MPS400－A00	YR－MPS400－B00
焊件偏心距/mm	<100（距回转中心，200 kg 载荷）		<130（距回转中心，400 kg 载荷）	
焊件重心距/mm	<700（距回转台面，200 kg 载荷）		<500（距回转台面，400 kg）	
回转角度/（°）	±370		±370	
最大回转速度/（°）·s^{-1}	120（20 r/min）		100（16.7 r/min）	
许用扭矩/N·m	196（20 kgf·m）		510	
许用转动惯量（$GD^2/4$）/kg·m^2	7.7		35	
驱动电动机	伺服电动机（SGMP－08AWYR33）		伺服电动机（SGMP－015AWYR33）	
回转精度/mm	±0.1（500 mm 直径）		±0.1（500 mm 直径）	
适用控制器	YASNAC MRC，YASNAC XRC		YASNAC MRC，YASNAC XRC	
自重/kg	110		150	
设备颜色	浅绿（标准色）		浅绿（标准色）	
内置输入/输出电缆	—	6 根	—	6 根
内置输气管	—	1 根	—	1 根

注：根据用户要求，可提供任意的回转角度。

表 7.4-40 MOTOPS－D200/D400 焊接变位机技术数据

	许用载荷/kg	200		400	
	类型	标准	带旋转接盘	标准	带旋转接盘
	型号	YR－MPD200－A00	YR－MPD200－B00	YR－MPD400－A00	YR－MPD400－B00
回转轴	焊件偏心距/mm	<100（距回转中心，200 kg 载荷）		<100（距回转中心，400 kg 载荷）	
	回转角度/（°）	±200	±370	±200	±370
	回转速度/（°）·s^{-1}	180（30 r/min）		160（26.7 r/min）	
	许用扭矩/N·m	196（20 kgf·m）		392	
	许用转动惯量（$GD^2/4$）/kg·m^2	17		44	
	驱动电动机	伺服电动机（SGMP－15WYR12）		伺服电动机（SGMP－15WYR12）	
倾斜轴	焊件重心距/mm	<135（距回转台面，200 kg 载荷）		<175（距回转台面，400 kg 载荷）	
	倾斜角度/（°）	±135		±135	
	倾斜速度/（°）·s^{-1}	120（20 r/min）		80（13.3 r/min）	
	许用扭矩/N·m	539（55 kgf·m）		1 274	
	许用转动惯量（$GD^2/4$）/kg·m^2	50		200	
	驱动电动机	伺服电动机（SGMP－15AWYR12）		伺服电动机（SGMP－22AWYR12）	
	回转精度/mm	±0.1（500 mm 直径）		±0.1（500 mm 直径）	
	适用控制器	YASNAC MRC，YASNAC XRC		YASNAC MRC，YASNAC XRC	
	自重/kg	110		150	
	喷涂颜色	浅绿（标准色）		浅绿（标准色）	
	内置 I/O 电缆	35 根电缆	6 根电缆	0.5 mm^2（截面面积）×35 根	0.5 mm^2（截面面积）×6 根
	内置输气管	1 根	1 根	3/8″×1 根	3/8″×1 根

注：根据用户要求，可提供任意的回转角度。



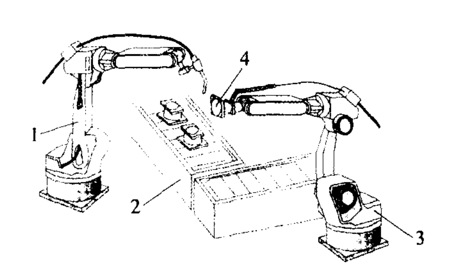


图 7.4-134　弧焊机器人与机器人式的焊件变位设备
1—弧焊机器人；2—焊件输送设备；
3—焊件变位设备；4—焊件

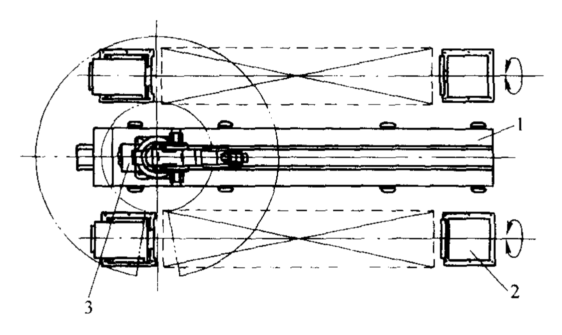
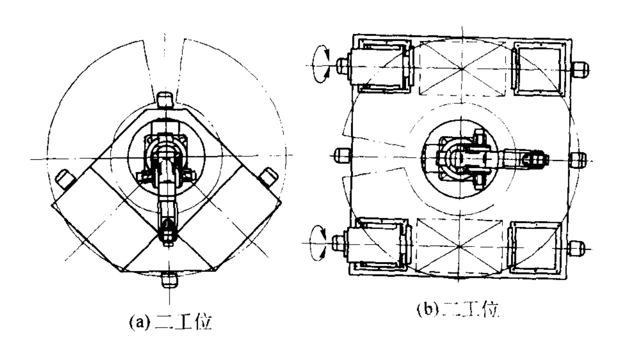


图 7.4-136　用于长形焊件的变位设备的布置
1—移行导轨；2—头尾架式的焊接翻转机；3—弧焊机器人



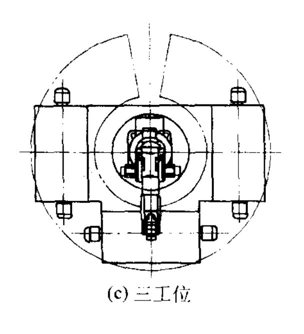


图 7.4-135　焊件变位设备的布置

编写：王政（兰州理工大学）



第5章　焊接安全与清洁生产

1　焊接清洁生产

1.1　焊接清洁生产的意义和内容

20世纪中叶以来，世界人口的爆炸性增长和工业经济的迅猛发展，造成了一系列环境问题，如日益严重的大气污染、固体废弃物污染和水环境污染；不断加剧的资源短缺，如水资源、森林资源、矿产资源的锐减；生态系统的破坏，以至于全球性气候变暖；臭氧层的破坏。这些问题无不危及人类的生存和健康，也已经极大地损害和制约经济的发展，甚至对地球的命运也造成了严重的威胁。

对上述诸项环境问题进行分析，不难看到环境问题都是人类自己制造的，又大都是现代工业科技发展的副产品。例如，焊接方法的发明使得金属结构的制造效率和可靠性大幅度提高。目前世界钢产量的40%～50%是由焊接方法制造成钢结构。但电弧焊接方法也带来了环境污染问题。电弧焊接过程中产生的烟尘被排放到大气中；产生的重金属粒子被混入土壤；产生的有害废渣不经处理被随意倾倒。我国的焊接材料年产量位于世界第一，2001年为120万吨，其中近80%为手工电焊条。据国外的研究报道，0.5%～1%的焊接材料在焊接过程中转变成烟尘排放到大气中，造成大气的污染。对于钎焊，在电工组装业中，软钎料采用的是锡铅钎料。含有有毒元素铅、镉等组分的钎料主要通过如下途径危害人们的健康：在钎料熔炼、加工和钎焊工作中，有毒金属蒸发，在空气中被氧化成氧化物，进入大气，被人吸入，或者沉降在土壤、溶入水中；用有毒钎料钎焊的产品也会对人造成污染，如盛装食品的容器，使食品受污染；废弃的电子产品污染土壤和地表水等。

面对众多严重的环境问题，人类从20世纪60年代以来，开始进行了严肃的思考。1972年6月，联合国在瑞典斯德哥尔摩召开了“人类与环境会议”，并通过了《人类环境宣言》。1987年，由前挪威首相布伦特兰夫人为首的《世界环境与发展委员会》发表了题为《我们共同的未来》的报告，鲜明地提出了必须为当代人和下代人的利益改变发展模式。1992年，联合国在巴西里约热内卢举行了“环境与发展大会”，通过了《里约热内卢环境与发展宣言》。首次提出，人类应遵循可持续发展的方针，并明确了可持续发展的定义是：既符合当代人的需求，又不致损害后代人满足其需求能力的发展。

1989年联合国环境规划署（UNEP）在总结工业污染防治概念和实践的基础上提出了清洁生产的名称，并在1990年召开的第一次国际清洁生产高级研讨会上正式推出了清洁生产的定义：清洁生产是指对工艺和产品不断运用综合性的预防战略，以减少其对人体和环境的风险。联合国环境署于1996年对清洁生产所作的新定义清楚地阐明清洁生产的内涵：清洁生产是指将综合性预防的战略持续地应用于生产过程、产品和服务中，以提高效率和降低对人类安全和环境的风险。对生产过程来说，清洁生产是指节约能源和原材料，淘汰有害的原材料，减少和降低所有废物的数量和毒性。对产品来说，清洁生产是指降低产品全生命周期（包括从原材料开采到寿命终结的处置）对环境的有害影响。对服务来说，清洁生产是指将预防战略结合到环境设计和所提供的服务中。2003年1月1日实施的“中华人民共和国清洁生产促进法”以法律的形式规定了清洁生产是我国走可持续发展的道路的一项基本国策。

实施清洁生产的意义在于清洁生产兼顾经济效益与环境效益，最大限度地减少材料和能源的消耗，降低成本，提高效益；变有毒有害的原材料或产品为无毒无害，对环境和人类危害最小；对生产全过程进行科学的改革和严格的管理，使生产过程中排放的污染物达到最小量；鼓励对环境无害化产品的需求和以环境无害化方式使用产品，环境危害大大减轻。因此清洁生产方式可以实现资源的可持续利用，在生产过程中就可以控制大部分污染，减少工业污染的来源，从根本上解决环境污染与生态破坏问题，具有较高的环境效益。无论从经济角度，还是从环境和社会角度来看，推行清洁生产技术均是符合可持续发展战略的，已经成为世界各国实施可持续发展战略的重要措施，成为可持续发展的优先领域。发展中国家已经丧失了发达国家在工业化过程中曾经拥有的资源优势和环境容量，不应该再重复先污染、后治理的道路。只有开展清洁生产，才能在保证经济增长的前提下，实现资源的可持续利用。环境质量不断改善，不仅使现代人能够从自然获取所需，而且为后代人留下可持续利用的资源和环境。

1.2　清洁生产的定义和原则

长期以来，科技的进步和工业的发展多着眼于开发新材料、新产品、新工艺、注意的是新材料的性质、新产品的功能、新工艺的效率，追求的是产品的产量、产品的质量以至寿命，有时也考虑产品的成本，以便获取更大的利润。而工业产品本身及工业生产过程对环境的破坏和危害，却长期被忽略。因此造成了资源的大量消耗浪费，污染的大量排放，甚至还使用或生产了很多有毒有害物质，对人类危害深重。

在这种指导思想的影响下，工业生产过程中大量投入的能源、资源并没有全部转化为最终产品，其中相当一部分甚至大部分却转化成了废物排入环境，造成了越来越严重的环境污染。20世纪60年代以来，为了减轻发展给环境所带来的压力，工业化国家通过各种方式和手段对生产过程末端的废物进行处理，这就是所谓的“末端治理”。这种方法可以减少工业废弃物向环境的排放量，但很少影响到核心工艺的变更。当时“末端治理”的思想和做法也已经渗透到环境管理和政府的政策法规中去。但实践逐步表明末端治理并不是一个真正的解决方案。很多情况下，末端治理需要昂贵的建设投资和惊人的运行费用，末端处理过程本身要消耗资源、能源，并且也会产生二次污染使污染在空间和时间上发生转移。因此，这种措施是不符合可持续发展战略的，是不能从根本上解决环境污染问题的。

对于“末端治理”的分析批判导致了解决环境污染问题新策略的诞生。20世纪70年代，许多关于污染预防的概念如“污染预防”、“废物最小化”、“减废技术”、“源削减”、“零排放技术”、“零废物生产”和“环境友好技术”等相继问世，都可以认为是清洁生产的前身。1989年联合国环境规划署（UNEP）在总结工业污染防治概念和实践的基础上提出了清洁生产的名称，并在1990年正式推出了清洁生产的定义。自此，在联合国的大力推动下，清洁生产逐渐为各国企业和政府所认可，清洁生产进入了一个快速发展时期，大量的清洁生产实践表明清洁生产可以达到环境效益和经济效益的双赢目标。

二十多年的理论研究和实践表明，清洁生产是资源持续利用、减少工业污染、保护环境的根本措施。在企业管理和



技术层次上，清洁生产不仅能够实现工业污染源达标排放和总量控制的目标，还可以促进企业整体素质的提高，增加企业的经济效益，提高企业的竞争能力，增加国际市场准入的可能性，减少贸易壁垒的影响。2000年10月在加拿大蒙特利尔市召开的第六届清洁生产国际高级研讨会，对清洁生产进行了全面的系统的总结，并将清洁生产形象地概括为技术革新的推动者、改善企业管理的催化剂、工业运行模式的革新者、连接工业化和可持续发展的桥梁。从这层意义上，可以认为清洁生产是可持续发展战略引导下的一场新的工业革命，是21世纪工业生产发展的主要方向。

1.3　清洁生产的实施途径

实施清洁生产常用的工具有：清洁生产审计、生态设计、生命周期评价（Life Cycle Assessment）、生态效率分析、公众环境报告、环境标签、环境税等等。其中最常用的是清洁生产审计和生命周期评价。清洁生产审计作为清洁生产最直接和最普遍的实践形式，是企业实施清洁生产的重要方法和工具，是指通过对一家企业的具体生产工艺和操作过程进行细致的调查和分析，掌握该企业产生的废物种类和数量，提出如何减少有毒和有害物料的使用以及废物产生的备选清洁生产方案，在对备选方案进行技术、经济和环境的可行性分析后，选定并实施一些可行的清洁生产方案，进而使生产过程产生的废物量达到最小或者完全消除的过程。

清洁生产的途径应包括企业的经营管理、政府的政策法规、技术创新、教育培训以及公众参与监督。其中，企业的经营管理是清洁生产的体现主体，政府的政策法规是清洁生产的调控手段，技术创新是清洁生产的强大推动力，教育培训和公众参与是清洁生产的保障。

推进清洁生产应遵从以下基本原则。

① 调控性　政府的宏观调控和扶持是清洁生产成功推行的关键。政府在市场竞争中起着引导、培育、管理和调控的作用，规范清洁生产市场行为，营造公平竞争的市场环境，从而使清洁生产在全国范围内有序推进。

② 自愿性　清洁生产应本着企业自愿实施的原则，通过建立和完善市场机制下的清洁生产运作模式，依靠企业自身利益来驱动。

③ 综合性　清洁生产是一种预防污染的环境战略，具有很强的包容力，需要不同的工具去贯彻和体现。在清洁生产的推进过程中，要以清洁生产思想为指导，将清洁生产审计、环境管理体系、环境评估等环境管理工具有机地结合起来，互相支持，取长补短，达到完整的统一。

④ 现实性　制定清洁生产推进措施应充分考虑中国当前的生态形势、资源状况、环保要求及经济发展需求等。

⑤ 前瞻性　作为先进的预防性环境保护战略，清洁生产服务体系的设计应体现前瞻性。

⑥ 动态性　清洁生产是持续改进的过程，是动态发展的。

清洁生产审计作为清洁生产最直接和最普遍的实践形式，是企业实施清洁生产的重要方法和工具，是指通过对一家企业的具体生产工艺和操作过程进行细致的调查和分析，掌握该企业产生的废物种类和数量，提出如何减少有毒和有害物料的使用以及废物产生的备选清洁生产方案，在对备选方案进行技术、经济和环境的可行性分析后，选定并实施一些可行的清洁生产方案，从而使生产过程产生的废物量达到最小或者完全消除的过程。

生命周期评价是对产品从最初的原材料采掘、原材料生产到产品制造、产品使用以及产品用后处理的全过程进行跟踪和定量分析与定性评价。它最早起源于对包装品环境问题的评价，当时称为资源与环境状况分析（REPA），其标志为1969美国中西部资源研究所（MRI）开展的Coco－Cola饮料包装瓶评价。1990年国际环境毒理学与化学学会（SETAC）首次提出生命周期评价的概念。1993年SETAC出版了《LCA纲要：实用指南》，为LCA方法提供了一个基本技术框架（包括定义目标与确定范围、清单分析、影响评价、影响说明解释四个部分），成为LCA研究起步的一个里程碑。1997年，ISO 14040（环境管理－LCA的原则和框架）、ISO 14041（清单分析）、ISO 14042（影响评价）和ISO 14043（影响解释说明）相继颁布。

1.4　清洁生产技术和方法

清洁生产技术和方法可以按照其作用的对象划分为原料（包括能源）、工艺过程和产品的清洁生产技术；从技术原理的角度可以划分为降低毒性、脱炭化和非物质化的清洁生产技术；从作用层次上可以划分为宏观（区域经济）、介观（装置水平）和微观（分子水平）的清洁生产技术；从实施所需成本分类则可以划分为高费、中费、低费、无费的清洁生产技术。应当指出，清洁生产技术和方法的分类是相对的，实践中更应该注重各种技术的整合。

20世纪80年代末期，美国、日本、德国等相继制定了清洁生产关键技术清单。这些技术大致可分为：有毒有害原料的替代技术；节能技术；物料循环使用或重复使用技术；先进的催化、分离技术等几大类。20世纪90年代以来，一系列新技术蜂拥而起。绿色制造业从产品设计开始到产品报废为止，尽可能地使产品的大部分零部件可以在产品更新换代时再利用。绿色化学提倡在分子水平上预防污染，并使原材料得到百分之百的利用。绿色石化行业追求的目标是消除对环境有害的石化产品。

1.5　我国焊接清洁生产现状

1.5.1　焊接清洁生产的内容

焊接领域的清洁生产应包括以下内容。

1）尽可能地减少能源的消耗和节约原材料。例如采用自动焊接方法取代手工电弧焊，提高生产率、节能，而且避免浪费废弃的焊条头。

2）尽可能地不使用有毒有害的物质，而用无毒低毒的物质来代替，最终淘汰有毒物质。例如淘汰含铅钎料，研制新型无铅钎料。

3）尽可能地不产生有毒有害物质的排放，降低粉尘和废弃物的数量和毒性。例如研制并推广使用低烟尘、低毒的焊接消耗材料。

4）在技术和经济可能的情况下，尽可能地使用可再生能源。

5）产品要设计成在其使用终结后，可降解为无害产物，或者可以循环再利用。例如报废的钎焊电路板上钎料的重复利用。

6）对危险物质生成前，实行在线监测和控制。

7）通过降低使用成本、降低污染治理的费用、增加产量和提高质量，使企业获得更大的经济效益。

8）按照清洁生产的原则，对焊接材料和焊接工程进行定量评估。

上述几个方面的内容，是焊接清洁生产应进行的工作。焊接工作者可以在这方面开展一系列的研究和推广工作。特别是要研究从源头而不是从生产过程的末端来解决废物的综合预防的办法和策略。

1.5.2　焊接清洁生产的现状

虽然我国的焊接材料的产量已跃居世界首位，但产品的设计还很少考虑到烟尘排放问题，每年消耗的120万吨焊接材料约产生1万吨烟尘。大量的有害气体不仅损害焊工的健



康，也增加了对大气环境的污染。针对焊接过程造成的烟尘排放污染问题，一些发达国家近些年来开始遵循清洁生产的原则，研究低发尘量的焊接材料——主要是低发尘量的药芯焊丝，如世界知名的焊接材料公司ESAB开发研究低发尘量、低飞溅率的药芯焊丝，可以使发尘量减少25%～70%。日本也在进行相关的研究。我国在焊接清洁生产方面进行了一些初步工作，具体如下。

1）推广高效节能的焊接电源　从电焊机的设计上着手，采用节省铜材料，并且节能的先进设计方案，并在电焊机的设计时，就考虑到产品报废回收时能循环利用问题。近年来，逆变焊机由于有节铜、节能、高效的优点而受到重视。

2）加紧无铅钎料的研制和推广　目前全球电子行业用钎料每年消耗的铅约为20 000 t，大约占世界铅年总产量的5%。铅和铅的化合物已被环境保护机构（EPA）列入前17种对人体和环境危害最大的化学物质之一。铅的毒性在于它是不可分解的金属，并且一旦被人体摄取会在人体中聚集而不能被排出，并且对人体产生严重毒害作用。铅与人体内蛋白质会强烈结合而抑制人体正常的生理功能，造成神经系统和代谢紊乱，使神经和生理反应迟钝，改变感知和行为能力，减少血色素而造成贫血以及高血压。同时铅的废弃物会污染土壤，渗入地下水，从而对生态构成威胁。在电子工业中，由于对电子组装产品的废弃物的主要处理措施是填埋于固体废弃物垃圾场，尽管目前还没有科学的数据和研究来说明铅是如何从废弃电子产品进入地下水和动物及人体食物链的，但是已有的资料表明这个过程与CO和CO_2的存在产生$PbCO_3$并分解出PbO有关。人们期待着工厂提高铅的回收率。但是，电子产品中回收铅受到极大限制，除了技术经济上的原因外，还由于回收铅产生的α粒子放射将远高于原始铅。而α粒子放射会使软件出错，因此其再次使用时会对集成电路的性能产生有害作用。

国际上的无铅钎料研发活动是从20世纪90年代起，无铅钎料的研发成为业界的关注热点。国际上相继组织了多次大型的研发活动。早期的研发计划集中于确定新型合金成分、多元相图研究和润湿性、强度等基本性能考察。后期的研发计划主要集中于五种合金系列：SnCu、SnAg、SnAgCu、SnAgCuSb和SnAgBi。并深入探讨其疲劳性能、生产行为和工艺优化。

目前已有多种无铅钎料面世，但还没有一种能够为Sn－Pb钎料的直接替代提供全面的解决方案。

目前，最吸引人的无铅钎料如下。

Sn－Ag－Bi系列合金钎料熔化温度在210℃附近，强度较高，但伸长率较差，导致轧制焊丝困难。该合金钎焊工艺性较好，可靠性较高。对用表面封装工艺获得的产品，疲劳寿命长，但对于插孔工艺连接的产品件，主要存在焊脚开裂，原因是铋的存在，导致接头失效。同时，铋、银将使钎料的成本上升。

Sn－Ag－Cu系列合金钎料熔化温度在217℃附近，熔点偏高，有良好的延展性，外观光亮，但强度偏低，另外，其疲劳寿命亦不及Sn－Ag－Bi系列合金。

Sn－Bi－Zn系列合金钎料的熔化温度范围在188～198℃，最有希望达到锡铅钎料的共晶温度，其成本低，有较高的强度，但塑性差，加工性能差。锡锌铋钎料的一个致命缺点在于锌的氧化及由此带来的钎料抗腐蚀性差、起氧化皮的问题。

3）低烟尘、低毒、高效率的焊接材料　研究新一代低烟尘、高效率的绿色焊接材料是我国可持续发展战略对焊接工作者提出的新课题，对于这一课题的研究在工业发达国家也刚刚起步，我国目前已有科研单位在开展这方面的研究，到2001年我国的焊接材料年产量位于世界第一，为120万吨，其中近80%为手工电焊条。0.5%～1%的焊条在焊接过程中转变成烟尘排放到大气中。造成大气的污染。如果新一代低烟尘、高效率的焊接材料能使烟尘排放减少50%，按照现在的生产能力，每年可以少向大气排放约5 000 t烟尘。

2　焊接中的污染及卫生防护

2.1　焊接烟尘的污染

2.1.1　影响烟尘数量和种类的因素

工业生产中应用最广的是各种弧焊，这种焊接工艺是一种小冶金过程，容易产生大量烟尘。在焊接过程中，焊条下端部在高温作用下产生部分蒸汽，在弧吹力的作用下，这些蒸汽由电弧区喷射到空气中，迅速冷却并被氧化，形成固态微粒，呈现出烟雾状。焊接烟尘的成分和数量，取决于焊条类型及被焊材料，焊接方法和焊接参数等因素。

（1）焊条类型的影响

焊条药皮由多种元素组成，施焊时，焊条（药皮）中各种元素在电弧作用下将引起挥发，随后冷凝形成烟尘。如果焊条母材和被焊材料产生的蒸汽压力较低，则容易出现金属氧化物，也成为焊接烟尘的组成部分。因此，电弧焊烟尘的成分和数量主要取决于焊条成分、元素挥发程度和电离电位状态。实验证明：钙型、钛型和纤维素型焊条发尘量较大；钛钙型焊条发尘量较小；不锈钢焊条的发尘量低于低碳钢焊条和低合金钢焊条。碱性焊条发尘致毒主要是药皮中萤石和水玻璃的作用，产生钾、钠、氟化物引起的，由于钾、钠、氟化物沸点低使碱性焊条发尘量几乎为酸性焊条的两倍，同时钾、钠、氟化物都溶于水，所以又是引起焊工金属热职业的主要致毒因素。

（2）焊接参数的影响

1）焊接电流的影响　在一般情况下，焊接电流增大，焊接烟尘随之增加，碱性焊条中可溶性氟的绝对含量也随着电流的增大而增加，见表7.5-1。

表7.5-1　碱性焊条发尘量与焊接电流之间的关系

焊接电流/A	电弧电压/V	发尘量/$g \cdot kg^{-1}$	含氟量/%	焊接速度/$m \cdot h^{-1}$
120	18～21	10.24	7.3	14
180	18～21	13.71	9.16	
230	18～21	17.52	12.31	

2）电弧电压（弧长）增大，焊接烟尘量也增多　试验证明，焊接电压高于例行范围时，焊条发尘量几乎可以增加一倍。

3）手工电弧焊极性对发尘量的影响　焊接极性改变对发尘量有影响。当反接时，要析出的热量通过整个溶滴传导，散热不易使发尘量增大，正接时析出的热量很易传导到固体焊芯上，使溶滴过热程度低于反接。表7.5-2是碱性焊条正反接发尘量比较。

表7.5-2　焊接碱性焊条正反接发尘量比较

焊条极性	电弧电压/V	焊接电流/A	发尘量/$g \cdot kg^{-1}$	含氟量/%	焊接速度/$m \cdot h^{-1}$
正接	18～21	180	10.41	9.18	13
反接	18～21	180	15.83	11.07	

4）焊件位置状态对焊接烟尘也有影响　平焊时发尘量最大，立焊时次之；焊条倾斜且焊条干燥时发尘量较小，反之则发尘量大，见表7.5-3。

表7.5-3　碱性焊条焊接倾角对发尘量的影响

焊条倾角 /(°)	电弧电压 /V	焊接电流 /A	发尘量 /g·kg^{-1}	焊接速度 /m·h^{-1}
90	18～21	180	11.90	14
70	18～21	180	13.25	
45	18～21	180	16.37	

（3）焊工技术水平的影响

当焊工技术水平较高时，将会随时关注焊条烘干程度、焊条倾斜角度、焊弧长短及焊件位置等状况，并能合理进行调整，所以与非熟练焊工相比，施焊时发尘量可减少20%～30%，焊接速度可提高10%～15%，而且焊接质量较好。

（4）焊接工艺方法的影响

几种焊接工艺方法产生的污染特点见表7.5-4，几种焊接方法的发尘量见表7.5-5。

2.1.2　焊接烟尘的危害性

在通常情况下，焊接烟尘含有臭氧、一氧化碳、二氧化碳、一氧化氮、二氧化氮、氟化氢、光气、氯乙烯和各种金属及金属氧化物微粒。吸进过多的焊接烟尘，将引起头痛、恶心、发烧、气管炎、肺病等。而且烟尘微粒可以通过人体表皮接触感染引发皮肤病。不同的焊接烟尘含有不同种类和不同数量的有害物质。它们引发的病症也不相同。根据这一情况，国际上通常把焊接烟尘分为6级（或6种）。见表7.5-6。

表7.5-4　几种焊接工艺方法产生的污染特点

焊接工艺方法	产生的污染特点
手工电弧焊	焊接铝材时，产生的有毒烟尘物质主要是氟化氯；当焊接灰铸铁和青铜时，产生的有毒物质主要是锰和氟。一般结构钢材焊接，产生的有毒物质主要是臭氧、一氧化碳、一氧化氮、氟化氢和金属微粒。烟尘量比焊接有色金属少得多
埋弧焊电渣焊	焊接时电弧被焊剂覆盖，电渣焊时以融渣的电阻热进行焊接，产生的烟尘极少，只有微量的氮氧化物，可认为是一种“安全”焊接方法
CO_2 焊	CO_2 气体保护电弧焊采用实芯焊丝时，发尘量相当于手工电弧焊，而药芯焊丝气体保护焊发尘量较高
氩弧焊	产生的烟尘与熔化极气体保护焊大致相同。但前者电弧所放射的紫外线使周围空气形成的臭氧较多
气焊和切割	产生的烟尘主要是由母材、钎料和钎剂受到高热蒸发而形成的。例如使用青铜钎料时，强烈的高热使锌元素形成氧化锌烟尘。气割时主要形成金属氧化物和氮化物烟尘
钎焊	钎焊时产生的有毒物质主要是氯化物和少量铅元素。使用黄铜合金硬钎焊时产生的有毒物质主要是镉、锌、铜、氧和氯。以氧乙炔焊为钎焊热源时，其高温会使空气中的氮气氧化成为一氧化氮
等离子弧焊	弧光辐射、臭氧、氮氧化物浓度均高于氩弧焊，还存在高频电磁辐射和放射性危害

表7.5-5　几种焊接方法的发尘量

焊接方法		施焊时发尘量 /mg·min^{-1}	焊接材料的发尘量 /g·kg^{-1}
焊条电弧焊	低氢型焊条（E5015，ϕ4）	350～450	11～16
	钛钙型焊条（E4303，ϕ4）	200～280	6～8
自保护焊	药芯焊丝（ϕ3.2）	2 000～3 500	20～25
CO_2 焊	实芯焊丝（ϕ1.6）	450～650	5～8
	药芯焊丝（ϕ1.6）	700～900	7～9
氩弧焊	实芯焊丝（ϕ1.6）	100～200	2～5
埋弧焊	实芯焊丝（ϕ5）	10～40	0.1～0.3

表7.5-6　焊接烟尘等级

焊接烟尘等级	对人体的影响程度
Ⅰ级	焊接烟尘包含的有害物质主要是铜、铬、锰、镍、钒、锌、镉、钴、氟化物、乙醛和氯乙烯等。这些物质会引起气管炎、哮喘病、肺气肿，特别是镍元素微粒和氯乙烯被吸进后，可能会引起肺癌和鼻癌，其平均潜伏期为20～25年
Ⅱ级	烟尘中包含的有害物质主要是镍、铬、石棉、石英、鳞石英、方晶石、光气和臭氧等。这些物质会引起慢性气管炎、贫血症等，特别是臭氧会刺激呼吸道黏膜，引起喉痛、咳嗽、胸痛和肺水肿
Ⅲ级	烟尘中的有害物质是铜、铅、锰、镍、锌元素等。这些物质会引起急性气管炎、突变性视力下降、发烧和恶心，特别是铅化合物，可引起中毒性脊髓损害和中毒性周围神经炎



续表 7.5-6

焊接烟尘等级	对人体的影响程度
Ⅳ级	焊接烟尘包含的有害物质主要是锰、铬、铅和氟化氢等。这些物质会引起一些慢性病，如慢性气管炎、慢性中毒精神病、呼吸道黏膜和间质的慢性炎症等
Ⅴ级	焊接烟尘包含的有害物质主要是铬、镍、钒和氟化物等。这些物质会引起皮炎和眼病，如皮肤干燥和色变、毛囊炎、药物性皮炎、视觉障碍和复视、结膜炎、眼睑和视网膜病变等
Ⅵ级	焊接烟尘包含的有害物质主要是少量的铁、铝和锡元素等。这些物质一般不会引起疾病，但焊接烟尘中伴有氮氧化物，吸进后仍会引起头痛恶心等症状

由上述可见，焊接烟尘危害人体的主要途径是呼吸道和皮肤。有害物质经呼吸道进入体内，是最主要最危害的途径。由于整个呼吸道和黏膜都具有很大的吸收能力，所以吸进的有害物质很快被吸收。特别是肺泡壁很薄（1～4 μm），总面积很大（55～120 m²），其表面被碳酸的液体所湿润，周围有丰富的毛细血管，所以通过肺泡吸收毒物很快。

皮肤吸收毒物的途径主要是表皮屏障和毛囊。在特殊情况下，也可通过汗腺导管进入体内，特别是皮肤比较潮湿、皮肤损伤或患有皮肤病时，其屏障作用被破坏，毒物被吸收的速度更快。经皮肤侵入人体的毒物，已不能经过肝和肺的解毒作用，而直接随血液循环分布全身，对人体的危害是很严重的。

2.2 焊接中的其他污染

2.2.1 噪声污染

噪声存在于焊接工艺中，其中声强很大，危害突出的焊接工艺要属等离子切割、等离子喷涂以及碳弧气刨，其噪声强度可达 120～130 dB 或更高；此外，焊工接触的主要噪声源还来自其他工种如校正时的锤击、铲边、修复铲根等。这些噪声水平远高于焊接工艺或设备产生的噪声强度。

长期在此环境中从事焊接的焊工会引起噪声性耳聋；另外超声波焊接时会受到超声波的影响，产生头痛、耳鸣、内耳疼痛等症状。

国际标准化组织推荐与人耳感音特性相似的 A 声级作为噪声卫生评价的指标。我国制定的《工业企业噪声暂行卫生标准》也是根据 A 声级制定的，其规定值示于表 7.5-7。

表 7.5-7 噪声卫生标准

每个工作日接触噪声时间/h	新建、扩建、改建企业允许噪声/dB（A）	现有企业暂时放宽允许噪声/dB（A）
8	85	90
4	88	93
2	91	96
1	94	99

注：最高不得超过 115 dB（A）。

2.2.2 光污染和有害射线污染

焊接时有害射线包括可见光、紫外线、红外线、放射线等。光和有害射线对人有害影响见表 7.5-8。

表 7.5-8 光和有害射线对人有害影响

光及有害射线种类	对人体的危害性
红外线	波长 0.76～1 000 μm。红外线对人体的危害是引起组织的热作用，使血液和深部组织灼伤。焊接时，眼部受到强烈的红外线辐射，立即感到灼痛，长期接触可能造成红外线白内障，视力减退
可见光	波长 400～760 nm。眼睛被电弧强光照射后，流泪、刺痛、看不清楚东西。短时丧失劳动能力
紫外线	波长 180～400 nm。紫外线作用于皮肤，可被皮肤不同深度的组织吸收，引起皮炎和慢性红斑。紫外线过度照射会引起急性角膜炎
放射性射线	氩弧焊和等离子弧焊的钍钨极会产生放射性污染，其主要的危害形式是钍极的衰变产物呈气溶胶或气体的形式溶入人体内，由于很难从体内排出，会在体内产生积蓄，聚集到一定程度会引起病变，造成中枢神经系统、造血器官和消化系统疾病，严重者可患放射病 真空电子束焊接过程中产生的 X 射线，具有一定的穿透力，如果操作者长期受到较高能量的 X 射线的照射，可引起慢性辐射损伤，出现神经衰弱和白细胞下降问题

2.2.3 高频电磁辐射

氩弧焊和等离子弧焊接，在引弧过程中使用高频振荡器，存在着一定强度的电磁辐射，构成对局部生产辐射环境污染。高频电磁辐射对人体的危害主要是引起神经衰弱和植物神经紊乱，严重时会使血压不正常。非熔化极氩弧焊和等离子弧焊时，每次启动高频振荡器的时间只有 1～2 s，由于作用时间短，一般不足以对人体造成危害。

2.3 降低污染的措施

2.3.1 降低焊接烟尘污染

（1）材料和工艺措施

材料和工艺上采取措施防止或降低焊接烟尘污染的办法见表 7.5-9。

（2）通风排烟措施

通风技术措施是消除焊接烟尘危害的有力措施。根据 ISO10882—1：2000 与 ISO10882—2：2000，焊接及相关工艺健康与安全－操作者呼吸区内微粒物与气体的取样，确定采用何种除尘与通风设施来控制烟尘排放量。不论是局部通风排烟，还是整体通风排烟，其共同点都是尽量在产生烟尘的源头就将其排走。如强力吸气风机、高真空可移动焊接烟尘净化器、墙装机械式烟尘净化器、可移动机械式烟尘净化器、墙装筒式过滤烟尘净化器、可移动筒式过渡烟尘净化器、可移动静电式烟尘净化器、多工位净化器等，其清洁有效率可达 99.9%。

焊接车间空气中有害物质的最高容许浓度见表 7.5-10。



表 7.5-9　工艺措施防止或降低焊接烟尘污染的办法

采用无烟尘或少烟尘的焊接方法	电阻焊、摩擦焊、埋弧焊及电渣焊均是高效、少或无烟尘的焊接方法。其中，20 世纪 90 年代发明的搅拌摩擦焊（FSW）作为用于低熔点合金材料的新型固态焊接技术，非常有利于工作环境的改善
开发和使用低尘低毒的焊接材料	目前，国内外在这方面进行了大量的研究工作，提出"绿色焊料"概念，如无铅钎料，通过焊料合金化来改善合金性能，提高焊接性。有关无铅钎料的标准也已出台，如 ISO 9453，ISO 9454，JISZ3282 等。对于手工电弧焊，应避免电流和电压过高。焊接碳素结构钢时最好采用交流焊；焊接不锈钢时应采用直流焊。仔细阅读焊接材料厂的说明和标记，根据烟尘的允许浓度，选择焊接烟尘较少的焊条。焊条药皮物质是产生焊接烟尘的主要来源之一，药皮物质中的碳酸盐、金红石、萤石、水玻璃等不仅其本身对焊接烟尘的产生有影响，且它们之间存在着复杂的相互影响。通过调整药皮物质中的碳酸盐、金红石、萤石、水玻璃之间的组成配比，有可能降低焊接时的烟尘量
提高焊接过程的机械化和自动化程度	随着电子计算机在焊接领域中的应用，工业机器人、数控切割等大显身手，焊接工作的质量、效率及自动化程度大大提高，作业环境也日趋改善

表 7.5-10　车间空气中有害物质的最高容许浓度

有害物质名称	最高容许浓度 /mg·m^{-3}	有害物质名称	最高容许浓度 /mg·m^{-3}
电焊烟尘	6	锰及其化合物（换算成 MnO_2）	0.2
含 10%（质量分数）以上游离二氧化硅的粉尘	2	铍及其化合物	0.001
含 10%（质量分数）以下游离二氧化硅的粉尘	10	三氧化铬、铬酸盐、重铬酸盐（换算成 CrO_3）	0.05
氧化铁粉尘	10	金属汞	0.01
铝、氧化铝、铝合金粉尘	4	氟化氢及氟化物（换算成 F）	1
氧化锌	5	臭氧（O_3）	0.3
铅烟	0.03	氧化氮（换算成 NO_2）	5
铅金属、含铅漆料铅尘	0.05	一氧化碳（CO）	30
氧化镉	0.1		

美国唐纳森 Torit DCE 推出的 TrunKline 系列焊烟除尘产品，如 Flex－TrunKTM 除尘器、TrunK2000™尘源式除尘系统、Ambient Collection System（AT－3000）环境除尘系统、DFT 沉流式除尘器，由于采用了效果优良的 Ultra－Web FR 阻燃滤筒，这种焊烟除尘产品对于亚微米级的焊烟粉尘过滤效果可高达 99.999%，可有效解决不同场合的污染问题。

在制造厂的大型焊接车间，根据烟尘浓度计算选择通风机，一般每小时应排风 10～15 次。对于因通风不良容易留下的死角，应配有局部通风机和使用抽气焊炬。这样可以接近焊位进行抽气，不但效率高，经济性也好。焊接工作台应配有焊接烟尘净化器（图 7.5-1）。

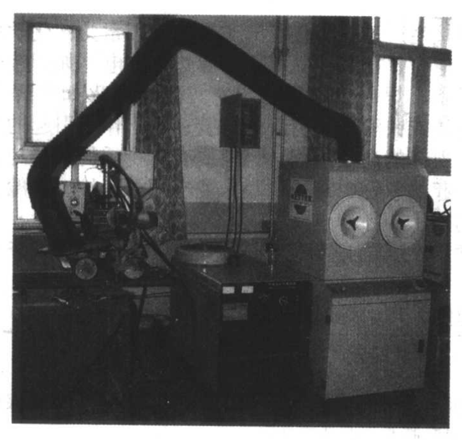


图 7.5-1　焊接烟尘净化器

（3）个人防护措施添加

如果使用通风设施达不到防护目的，就必须使用呼吸保护设备，特别是在工作量较大和焊接工位空间较小的条件下，烟尘中含有铍、镉、铜、镉酸盐和有机涂料等有害物质时，应配戴有过滤介质的口罩、呼吸器、可供给新鲜空气的头盔或整套呼吸装置。但呼吸保护设备不能代替抽吸设施，因为它保护的只是操作者，对他人仍有危害。

（4）适当采取隔离操作和遥控装置

因生产条件所限而无法使焊接烟尘降到标准规定值时，可以采取隔离操作措施。即把生产设备和操作地点放在隔离室内，用排风扇使隔离室内保持负压状态。或采用自动遥控系统实施焊接，使操作人员远离焊位，不直接受到焊接烟尘危害。

2.3.2　降低噪声的污染

选用节能型的逆变弧焊电源，淘汰旋转式直流弧焊电源。

采用等离子弧焊接、切割工艺时，等离子的喷射速度高达 10 000 m/min，噪声均在 100 dB 以上，应调节合理的气体流量及选用合适的气体，以保证操作工艺正常，使噪声符合要求。

操作者要佩戴隔音的耳塞等防护器具，同时在车间的设计与工艺流程中要考虑噪声传播途径，以进行有效的控制。

2.3.3　光污染和射线污染的防护

光污染的防护如下。

1）置弧光防护屏　在弧焊工位周围用薄钢板制成防护屏，防止弧光射出。

2）佩戴合适的焊接面罩　焊接面罩有手持型和头戴型，



在固定工位上还可以在防护屏上开孔安装滤光片。

护目滤光片的种类如下。

① 吸收式滤光片俗称黑玻璃片。

② 吸收 - 反射式滤光片　在吸收式滤光片表面镀有高反射率的膜，对强光有反射和吸收双重作用，对红外线反射效果好。

③ 光电式镜片　是根据光电转换原理制成的新型护目镜，起弧前是透明的，起弧后迅速变黑起滤光作用。

焊接面罩和护目滤光片应符合国家标准 GB/T 3609—1994，滤光片的透过率要符合表 7.5-11 中的规定。推荐使用的滤光号列于表 7.5-12。

表 7.5-11　焊接目滤光片透过率性能要求

滤光号	紫外线透过率/%		可见光透过率/%		红外线透过率/%	
	313 nm	365 nm	最大	最小	近红外 780 ~ 1 300 nm	中近红外 13 000 ~ 2 000 nm
1.2	0.000 3	50	100	74.4	37	37
1.4	0.000 3	35	74.5	58.1	33	33
1.7	0.000 3	22	58.1	43.2	26	26
2	0.000 3	14	43.2	29.1	21	13
2.5	0.000 3	6.40	29.1	17.8	15	9.6
3	0.000 3	2.80	17.8	8.5	12	8.5
4	0.000 3	0.95	8.5	3.2	6.4	5.4
5	0.000 3	0.30	3.2	1.2	3.2	3.2
6	0.000 3	0.10	1.2	0.44	1.7	1.9
7	0.000 3	0.037	0.44	0.16	0.81	1.2
8	0.000 3	0.013	0.16	0.061	0.43	0.68
9	0.000 3	0.004 5	0.061	0.023	0.20	0.39
10	0.000 3	0.001 6	0.023	0.008 5	0.10	0.25
11	0.000 6	0.000 6	0.008 5	0.003 2	0.05	0.15
12	0.000 2	0.000 2	0.003 2	0.001 2	0.027	0.097
13	0.000 076	0.000 076	0.001 2	0.000 44	0.014	0.06
14	0.000 027	0.000 027	0.000 44	0.000 16	0.007	0.04
15	0.000 009 4	0.000 009 4	0.000 16	0.000 061	0.003	0.02
16	0.000 003 4	0.000 003 4	0.000 061	0.000 029	0.003	0.02

表 7.5-12　焊接滤光片推荐使用滤光号

滤光号	电弧焊与切割	气焊与气割
1.4，1.7，2	防侧光及杂散光	—
2.5，3，4	辅助工种	—
5，6	30 A 以下电弧焊作业	—
7，8	30 ~ 70 A 电弧焊	工件厚度 3.2 ~ 12.7 mm
9，10	75 ~ 200 A 电弧焊	工件厚度 12.7 mm 以上
11，12，13	200 ~ 400 A 电弧焊	等离子弧喷涂
14	500 A 电弧焊	等离子弧喷涂
15，16	500 A 气保焊	—

焊接时要穿戴防紫外线的工作服，尤其在钨极氩弧焊时，钨极要选用非放射线的铈钨极。在选用钍钨极时，必须遵守合理的操作规程，避免钨极过量烧损。在磨尖钍钨极时，应戴上防尘口罩，同时在接触钍钨极后，用流水和肥皂洗手，并经常清洗工作服及手套。

3　焊接安全生产

焊接生产过程中存在的主要危险因素为：化学危险品如乙炔、电石、压缩纯氧引起的爆炸；带电体如焊接电源、焊钳、焊条、焊件引起的触电、火灾；明火如气焊火焰、电弧、熔渣或铁液飞溅引起的灼烫；水下作业引起的触电；登高作业引起的高处坠落；燃料或有毒物质的容器与管道检修焊补引起的急性中毒；狭小作业空间如锅炉、船舱或地沟里引起的溺水。

常用焊接方法对可能引起的人体和环境危害列于表 7.5-13。

表 7.5-13　常用焊接方法对可能引起的人体和环境危害

名称	可能引起的人体和环境危害
手工电弧焊	带电作业机会多，触电是主要危险，电焊烟尘是主要有害因素。在通风不良条件下会造成呼吸系统疾病。焊工尘肺是多见职业病，还有锰中毒。此外，弧光辐射会对眼睛和皮肤造成伤害



续表 7.5-13

名称	可能引起的人体和环境危害
氩弧焊	有毒气体臭氧和氮氧化物是主要有害因素，在空间狭小、通风不良和较长时间的连续作业，会造成呼吸系统疾病：支气管炎、气管炎，严重时甚至造成肺水肿。弧光辐射强度比手工电弧焊大，强烈的紫外线照射能引起红斑、小水泡等严重皮肤疾病，钨极氩弧焊有高频电磁辐射和放射性危害，存在触电危险
CO_2 焊	一氧化碳的慢性中毒是多见的职业危害，在通风不良的条件下，焊工血液中的碳氧血红蛋白往往高于正常。弧光辐射强度大于手工电弧焊，存在触电危险
等离子弧焊	弧光辐射、臭氧、氮氧化物浓度均高于氩弧焊，同时还存在噪声、高频电磁场、热辐射和放射性等有害因素，劳动卫生条件差，存在触电危险。同时还存在弧光辐射和噪声
碳弧气刨	高浓度的金属烟尘是主要有害因素，能造成呼吸系统疾病，尤其是在容器或舱室内的操作，其危害性更大，还存在有毒气体苯并芘，操作中火花剧烈飞溅，能造成灼烫和火灾
电子束焊	X 射线是主要有害因素，尤其是采用高压型电子束焊机时，X 射线比较强烈
电渣焊	熔渣和液态金属会因漏水而喷溅，造成烧伤或着火，甚至引起熔池爆炸。存在触电危险
气焊与气割	接触化学危险品的机会多，着火和爆炸是主要危险，焊接铝、铜等有色金属时，有毒的金属蒸气能引起急性中毒
登高焊割作业	高处坠落是主要危险，同时存在触电和物体打击的危险性。在作业点下方和熔渣铁液飞落所及的地点，存在火灾危险性
水下电焊与切割	存在溺水、触电、灼烫和潜水病等危险性
燃料容器检修焊补	着火爆炸是主要危险。检修焊补装有毒物质的设备时，有中毒危险

3.1 气焊与气割安全

3.1.1 概述

凡能引起火灾或爆炸危险的物品统称为危险物品。将其理化特性列于表 7.5-14。

气焊与气割所使用的乙炔、液化石油气、氢气、氧气和电石等都属于危险物品；氧气瓶、乙炔气瓶和液化石油气瓶等属于压力容器。在气焊与气割操作中或焊补燃料容器和管道时，都需要与危险物品和压力容器接触，同时又使用明火，如果焊接设备或安全装置有缺陷，或者违反安全操作规程，就容易造成爆炸和火灾事故。

表 7.5-14 易引起火灾或爆炸危险的危险物品的理化特性

爆炸性物质	这类物品有强烈的爆炸性，受热、摩擦、冲击作用或与某些物质接触后，能发生剧烈化学反应而爆炸。包括各种炸药、起爆药，如雷汞、硝化甘油、TNT（三硝基甲苯）等
可燃气体	可燃气体物品受热、受冲击或遇到火源时能发生燃烧和爆炸，特别是处在压缩状态时的爆炸危险性更大，如氢气、乙炔、一氧化碳等
可燃液体	这类物品容易挥发，能引起火灾和爆炸，如酒精、苯、汽油等
可燃固体	这类物品有的受热后分解出气态产物，很容易燃烧，甚至引起爆炸，如硝化纤维素、红磷、二硝基甲苯等；有的受热熔化，进而引起燃烧，如沥青、松香、石蜡等；也有的受热后直接燃烧，如硫磺、镁粉、铝粉等
遇水燃烧物质	这类物品遇水时产生可燃气体，并放出高热，该热量能促使可燃气体的着火爆炸，如碳化钙（电石）、钠、钙等
自燃物质	有些物质由于受空气氧化或外界温、湿度的影响，温度升高而无需外来火源即能自行着火，如黄磷、油布、油纸、硝化纤维胶片等
氧化剂	氧化剂本身不燃烧，但有很强的氧化能力，与某些危险物品接触时，能促使这些危险物品分解，进而引起燃烧和爆炸。氧、一些含氧的盐类和氧的化合物都是氧化剂，如硝酸盐、氯酸盐、过氧化物、铬酸盐等

在气焊火焰的作用下，尤其是气割时氧气流的喷射，使火星和熔渣四处飞溅，容易造成灼烫事故，而且较大的火星和熔渣能飞溅到距离操作点 5 m 以外的地方，引燃可燃易爆物品，而发生火灾和爆炸。

工矿企业（尤其石油、化工、冶金、造船、建筑和桥梁等）设备与管道的安装和检修焊补，经常需要进行高空气割与气焊作业，这就存在着高空坠落以及落下的火星引燃地面的可燃物品等不安全因素。

气焊的火焰温度高达 3 000℃以上，被焊金属在高温作用下蒸发形成金属烟尘。在焊接铅、铜和铝等有色金属及其合金时，除了产生相应的有毒金属蒸气外，焊剂还会散发出氯盐和氟盐的气体产物；黄铜的焊接过程中散发大量氧化锌烟尘；铅的焊接过程中散发铅和氧化铅烟尘等有害物质。在焊补作业中，还会遇到其他生产性毒物和有害气体，尤其是在密闭容器、管道内的气焊作业，可能造成焊工急性中毒事故。



3.1.2 几种物质的燃烧爆炸特性

1）乙炔 乙炔物理化学性质和可能产生的不安全因素列于表 7.5-15。

2）电石 电石物理化学性质和可能产生的不安全因素列于表 7.5-16。

表 7.5-15 乙炔物理化学性质和可能产生的不安全因素

物理化学性质	1）乙炔属于不饱和的碳氧化合物，化学式为 C_2H_2，结构式为 $HC \equiv CH$，具有高的键能，化学性质非常活泼，容易发生加成聚合和取代反应。在常温常压下是一种高热值、容易燃烧和爆炸的气体，相对密度为0.91。乙炔的燃烧反应式为： $$2C_2H_2 + 5O_2 = 4CO_2 + 2H_2O + Q$$ 2）乙炔的自燃点低，为335℃，容易受热自燃；火焰传播速度快，在空气中传播的最高速度为2.87 m/s，在氧气中为13.5 m/s，点火能量小，仅为 1.9×10^{-5} J，容易发生爆炸
可能产生的不安全因素	1）温度过高时易发生爆炸。当温度超过200～300℃时，乙炔分子就开始聚合反应，形成其他更复杂的化合物，如苯（C_6H_6）、苯乙烯（C_8H_8）等。聚合反应是放热反应，例如 $3C_2H_2 \rightarrow C_6H_6 + 627$ kJ/mol。其放出的热量能促使聚合反应加速进行，如此形成恶性循环。最后当温度高于500℃时，未聚合的乙炔分子就会发生爆炸性分解，其反应式为：$C_2H_2 \rightarrow 2C + H_2 + 226$ kJ/mol。分解的生成物是细粒固体碳及氢气。如果这种分解反应是在密闭容器（乙炔发生器或乙炔气瓶）内进行时，则由于温度的升高，压力增大而引起爆炸。显然，若能将容器里的热量及时导出，则可避免乙炔的爆炸性分解 2）压力过高时易发生爆炸。增加压力也能促使和加速乙炔的聚合和分解反应。当压力为0.147 MPa，温度超过580℃时，就能形成乙炔的分解爆炸 3）乙炔的分解爆炸与触媒剂有关。试验表明，某些触媒剂能把乙炔分子吸附在多孔的表面上，结果乙炔的表面浓度增高，加速了乙炔分子之间的聚合和爆炸分解。触媒剂的这种吸附作用，使得装盛过乙炔气的容器，即便是空的，也存在爆炸危险。存放乙炔的容器直径越小，则越不易爆炸。这是由于管壁的冷却作用和流动阻力的缘故。在细管中，乙炔爆炸的可能性大为降低。乙炔与铜、银和水银等金属或其盐类长期接触时，会生成乙炔铜（Cu_2C_2）和乙炔银（Ag_2C_2）等爆炸性化合物，当受到摩擦或冲击时就会发生爆炸，反应式 $Ag_2C_2 \rightarrow 2Ag + 2C + Q$。因此，凡供乙炔使用器材（容器、管道、阀门、衬垫及其他零件），都不能用银和含铜量在70%以上的铜合金制作 4）工业用乙炔含有磷化氢和硫化氢。这是由于电石含有少量磷化钙和硫化钙，与水作用而生成，其反应式为 $$P_2Ca_3 + 6H_2O = 2PH_3 + 3Ca(OH)_2$$ 或 $$P_2Ca_3 + 4H_2O = PH_3 + 2Ca(OH)_2$$ $$Ca_3S + 2H_2O = H_3O + Ca(OH)_2$$ 磷化氢和硫化氢都是有害杂质。尤其是磷化氢的自燃点很低，在100℃的温度下就会发生自燃，是引起乙炔发生器着火爆炸的原因之一 5）乙炔与空气、氧气或氯气混合时，则增加其爆炸危险性。乙炔与空气混合而形成的气体自燃点为305℃，在这一温度，即使在大气压力下也能使爆炸性混合物发生爆炸；乙炔与氧气混合有较宽的爆炸极限范围（2.8%～93%），其自燃点为300℃；乙炔与氯气、次氯酸盐等化合，在日光照射下或加热就会发生燃烧爆炸，所以，乙炔着火时禁止用四氯化碳灭火器扑救。此外，乙炔也不能同氟、溴、碘、钾和钴等能起化学反应的元素接触

表 7.5-16 电石物理化学性质和可能产生的不安全因素

物理化学性质	电石是碳化钙的俗称，分子式为 CaC_2。电石属于遇水燃烧一级危险品，即电石与水接触时立即产生化合作用，生成乙炔并同时放出大量的热，该热量足以引起乙炔的着火爆炸，其反应式为 $$CaC_2 + 2H_2O = C_2H_2 + Ca(OH)_2 + 127 \text{ kJ/mol}$$ 理论上分解1 kg电石，必须消耗0.562 kg水，同时得到0.406 kg乙炔和1.156 kg熟石灰，并产生1 986 kJ的热量
可能产生的不安全因素	1）电石过热是乙炔发生器着火爆炸的主要原因之一。电石和水有很大的化学亲和力，它甚至能吸收空气中的水蒸气或夺取盐类中的结晶水而产生化合作用。如果乙炔发生器内的水量不足，或由于不按规定及时换水，致使水质混浊，那么化学反应过程就得不到良好的冷却条件，结果上述电石分解产生的热量，可能使化学反应区的温度很快上升，如果温度超过200℃，就可能发生下列反应 $$CaC_2 + Ca(OH)_2 = C_2H_2 + 2CaO$$ 在这种情况下，电石因夺去 $Ca(OH)_2$ 所含的水分而分解，造成熟石灰以密实的外皮包围着电石块，使电石剧烈地过热，当温度超过580℃时，即使在正常工作压力（小于0.147 MPa）下，也会引起乙炔的燃烧和分解爆炸。根据发生器的不同工作原理，分解1 kg电石的用水量，包括分解和冷却用水应为5～15 kg 2）电石的着火爆炸危险性与其分解速度有关。电石与水作用的分解速度是以每千克电石在分解时间内所产生的乙炔气体的体积来测定，其单位是L/（kg·min）。它与电石的粒度及水的纯度、温度等有关，其中粒度是最主要的影响因素，对粒度为2～8 mm至50～80 mm的电石来说，其完全分解的时间变动于5.5～13 min之间。电石粒度越小，分解速度越快。一般结构的发生器严禁使用粒度小于2 mm的电石粉（俗称芝麻电石），这种电石遇水后立即快速分解，冒黄烟，发生高热，能促使乙炔自燃。当发生器内含有空气时，将引起爆炸和着火

3）液化石油气　液化石油气物理化学性质和可能产生的不安全因素列于表 7.5-17。

表 7.5-17　液化石油气物理化学性质和可能产生的不安全因素

物理化学性质	液化石油气是炼油工业的副产品，其成分不稳定，主要由丙烷（C_3H_8）等气体混合组成。在常温常压下，组成液化石油气的这些碳氢化合物以气体状态存在，但只要外加不大的压力即变成液体，因此便于装入瓶中贮存和运输
可能产生的不安全因素	液化石油气的组成部分都能和空气形成爆炸性混合气，但它们的爆炸极限范围都比较窄，例如丙烷、丁烷和丁烯的爆炸极限分别为 2.17% ~ 9.5%、1.15% ~ 8.4% 和 1.7% ~ 9.6%，比乙炔要安全得多。但液化石油气与氧气的混合气有较宽的爆炸极限范围 3.2% ~ 64% 液化石油气易挥发，闪点低（如组分丙烷的挥发点为 -42℃，闪点 -20℃）。其燃烧反应式以丙烷作代表为： $C_3H_8 + 5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O + 2\ 343\ kJ/mol$ 火焰温度为 2 000 ~ 2 850℃。气态石油气比空气重（约 1.5 倍），易于向低处流动而滞留聚集。此外，液态石油气如果从气瓶中滴漏出来，会很快扩散成 350 倍体积的气体 液化石油气对普通橡胶导管和衬垫有使其膨润和腐蚀作用，能造成胶管和衬垫的穿孔或破裂，引起漏气

液化石油气在焊接工艺上的应用正在逐步推广，目前主要应用于气割，也可用于焊接有色金属。有关液化石油气与氧气混合气的燃烧爆炸性能见表 7.5-18。

表 7.5-18　液化石油气 - 氧气混合气的燃爆范围

序号	液化石油气在混合气中占的体积百分比/%	燃爆情况
1	3.2	爆声微弱
2	6.0	有爆声
3	6.7	有爆声
4	12.9	有爆声
5	19.1	爆声较响
6	33.1	爆声响
7	36.2	爆声响
8	43	爆声响
9	51.5	爆声、强烈发光
10	64	爆声、强烈发光

随着我国石油化学工业的发展，液化石油气的来源更加丰富，以它代替乙炔用于气割，具有较好的安全性。虽然比乙炔的火焰温度低，钢板的预热时间稍长，但可减少切口的过烧现象，提高切口的光洁度和精度，同时可以将几层钢板叠在一起切割，结果切割速度比使用乙炔时提高了 20% ~ 30%。因此，在经济性及安全方面都有很大的优越性。在推广应用液化石油气代替乙炔的焊接工艺时，尚需在实践中进一步改进焊炬、割炬、喷嘴的结构，以保证充分燃烧和提高火焰温度。

4）氧气　氧气物理化学性质和可能产生的不安全因素列于表 7.5-19。

金属的燃点随着氧气压力的增高而降低的关系见表 7.5-20。

气焊与气割用氧气的纯度一般分为两级，一级纯度的含氧量不低于 99.2%，二级纯度不低于 98.5%。氧气用压缩机压进钢瓶或管道。满灌氧气瓶的压力为 15.3 MPa，输送管道内的压力为 0.51 ~ 1.53 MPa。

表 7.5-19　氧气物理化学性质和可能产生的不安全因素

物理化学性质	在常温和常压下，氧气是一种活泼的助燃气体，是强氧化剂。增加氧的压力和温度，会使氧化反应显著地加剧
可能产生的不安全因素	氧气几乎能与所有的可燃气体和蒸汽混合而形成爆炸性混合物，这种混合物具有较宽的爆炸极限范围。多孔性有机物（炭、炭黑、泥炭和羊毛纤维等）如浸透了液态氧（所谓液态炸药），在一定的冲击力下，就会产生剧烈的爆炸 有机物的氧化反应具有放热的性质，当矿物油、油脂或细微分散的可燃粉尘（灰粉、有机物纤维等）与压缩纯氧接触时，由于剧烈的氧化升温、积热能够发生自燃，是造成火灾或爆炸的因素之一。因此，使用压缩状态下的氧气时，必须经常注意不得使它与有机物质及其他可燃物质接触

表 7.5-20　金属的燃点

氧气压力/MPa	金属的燃点/℃				
	0.1	1.02	3.57	7.14	12.85
铜	1 050	1 085	905	835	780
低合金钢	950	920	825	740	630
低碳钢	·	1 277	1 104	1 018	944

3.1.3　乙炔发生器安全技术措施

乙炔发生器是利用电石与水相互作用来制取乙炔的设备。电石和乙炔都属于危险物品，在加料或发生回火时，空气、氧气或火焰可能会进入发生器内，所以乙炔发生器是有着火爆炸危险的设备。

1）乙炔发生爆炸着火的原因　表 7.5-21 中列出乙炔发生爆炸着火的主要原因。



表 7.5-21 乙炔发生爆炸着火的原因

发生器着火爆炸的主要原因	1）结构设计不合理，冷却用水不足，或没有按时换水等原因造成电石过热 2）缺少必要的安全装置或安全装置失灵 3）发生器罐体或胶管连接处漏气 4）装料换料时遇明火，或发生器运动部分的机件相互摩擦碰撞，产生火花 5）在发生器罐体或胶管中形成乙炔与空气（或氧气）混合气 6）由于回火而引起 7）电石含磷过多、颗粒太细或含有硅铁 8）发生器的压力或温度过高

2）乙炔发生器的安全装置及安全使用　乙炔发生器的安全装置有阻火装置－回火防止器；防爆泄压装置如安全阀和爆破片；指示装置如压力表、温度计和水位指示器等。有关乙炔发生器的安全装置见表 7.5-22。

表 7.5-22 乙炔发生器的安全装置

乙炔发生器的安全装置	1）回火防止器　回火防止器是乙炔发生器必不可少的安全装置。对回火防止器的基本要求是：a. 能够可靠地阻止火焰和爆炸波的传播，并且把爆炸混合气体排泄到大气里去；b. 能够满足焊接工艺的要求，不影响火焰的温度、气体流量等；c. 应具有泄压装置；d. 在发生回火时能自动地切断气源 2）爆破片　在发生器的发气室、贮气室和回火防止器等罐体的适当部位设置一定面积的脆性材料（如铝箔片等），构成薄弱环节。当爆炸发生时，这些最薄弱处在起爆后，在较小的爆炸压力作用下，将首先遭受破坏，将大量气体和热量泄入大气，爆炸压力也就很难再度继续升高，从而保住容器的主体，避免设备遭受更大损失和在场人员的伤亡。常用铝箔片制作爆破片。它的特点是延伸性和弹性都小，脆性大，并有足够的强度。厚度 0.1 mm 的铝箔片破裂压力为 0.18～0.2 MPa，使用寿命长，气密性好。当泄压孔直径小于 100 mm 时，可采用厚度为 0.1 mm 的铝箔片；孔径为 100～300 mm 时，应采用 0.2 mm 厚的铝箔片，以便消除爆破片发生鼓包变形现象。同时可以在铝箔片上刻刀痕或滚花，以减弱爆破片的破裂强度，保证在发生爆炸时及时破裂 3）安全阀　亦称泄压阀，它的作用是保证中压乙炔发生器的压力升至 0.117 MPa 时能自动开启，把罐内乙炔放出一部分，以保证不超压运行，从而实现把乙炔压力自动控制在安全规定的范围内。安全阀一般采用的是弹簧式，它是利用乙炔气体压力与弹簧压力之间的压力差变化，来达到自动开启或关闭的要求 4）压力表　中压乙炔发生器必须装设压力表，表盘上 0.147 MPa 为红色刻度线，即是中压乙炔发生器最高工作压力

3.1.4 气瓶使用安全措施安全要求

用于气焊与气割的氧气瓶属于压缩气瓶，乙炔瓶属于溶解气瓶，液化石油属于液化气瓶。

常用气瓶使用安全措施见表 7.5-23。

表 7.5-23 常用气瓶使用安全措施

氧气瓶	1）避免在搬运装卸时，气瓶从高处坠落、倾倒或滚动，发生剧烈碰撞冲击 2）为了保证安全，使用过程中还必须每三年定期对气瓶作技术检验 3）防止氧气瓶直接受热。夏季用车辆运输或在室外使用气瓶时，应加以遮盖，避免阳光暴晒。气瓶库房和气瓶使用时，应远离高温、明火、熔融金属飞溅物和可燃易爆物质等，一般规定相距 10 m 以上。操作时，距乙炔瓶 5 m 以上 4）氧气瓶使用时，首先要作外部检查，检查的重点是瓶阀、接管螺纹和减压器是否有缺陷。如发现有漏气、滑扣、表针动作不灵等，应及时报请维修，切忌随便处理。禁止带压拧紧瓶阀的阀杆、调整垫圈等。检查是否漏气时应用肥皂水，不得使用明火 5）气瓶内的气体不应放空，应留有 0.1～0.2 MPa 的压力 6）氧气瓶着火时，应立即关闭阀门
乙炔瓶	1）乙炔气瓶是一种用于贮存和运输乙炔的压力容器，在 15℃时的充装压力为 1.58 MPa，瓶体外表面漆白色，并标注红色的“乙炔”和“火不可近”字样。溶解于丙酮的乙炔比气态乙炔的爆炸危险性小得多，瓶内溶剂又被吸附在具有显微孔的固态多孔填料（常用硅酸钙或活性炭）内，溶解的乙炔就更安全 2）使用乙炔瓶时，必须配用合格的乙炔专用减压器和回火防止器 3）瓶体表面温度不得超过 40℃。瓶温过高会降低丙酮对乙炔的溶解度，导致瓶内乙炔压力急剧增高。在普通大气压下，温度 15℃时、1L 丙酮可溶解 23 L 乙炔，30℃为 16 L，40℃时为 14 L。因此，在使用过程中要经常触摸瓶壁，如局部温度升高超过 40℃（会有些烫手），应立即停止使用，可以采取水浇降温 4）乙炔瓶存放和使用时只能直立，不能横放，以防丙酮流出引起燃烧爆炸（丙酮蒸气与空气混合气的爆炸极限为 2.9%～13%）。乙炔瓶直立牢靠后，应静候 15 min 左右，才能装上减压器使用 5）存放乙炔瓶的室内应注意通风换气，防止泄漏的乙炔气滞留 6）乙炔瓶不得遭受剧烈振动或撞击，以免填料下沉，形成净空间 7）气瓶不应放空，应留有 0.1～0.15 MPa 的压力

续表 7.5-23

液化石油气瓶	1）用于贮存和运输液化石油气的气瓶最大工作压力为1.63 MPa，气瓶外表涂灰色，并用红色标有“液化石油气”字样 2）液化石油气瓶在充灌时，必须按规定留出15%的汽化空间，不得充灌过满 3）必须采用耐油性强的橡胶，不得随意更换衬垫和胶管，以防腐蚀漏气 4）冬季使用石油气瓶时，可在用气过程中以低于40℃的温水加热，也可采用将几个液化石油气瓶并联，以保证供气量，但严禁用火烤或沸水加热，不得靠近加热炉或暖气片等热源，也不得为增加汽化面积而将气瓶横躺卧放。液化石油气瓶的压力在零下40℃时压力为0.1 MPa，在20℃时则为0.7 MPa，在40℃时压力上升可达1.9 MPa 5）使用和贮存液化石油气瓶的车间和库房的下水道排出口，应设置安全水封；电缆沟进出口应填装砂土；暖气沟进出口应砌砖抹灰，防止液化石油气窜入其中发生火灾、爆炸。室内通风孔除设在高处外，低处亦应设有通风孔，以利空气对流 6）应经常检查减压器的工作性能是否正常。减压器的作用不仅是把瓶内的液化石油气压力降低，而且在气割时，一旦氧气倒流入液化石油气系统，减压器的高压端能自动封闭，具有逆止作用 7）不得自行倒出液化石油气残液，以防遇火成灾 8）气瓶在使用过程中必须根据国家《气瓶安全监察规程》的要求，进行定期技术检验

乙炔瓶内允许极限压力与环境温度的关系见表7.5-24。

各种气瓶应涂有规定的颜色和标志，以便识别。颜色和标志的规定见表7.5-25。

表 7.5-24　乙炔瓶内允许极限压力与环境温度的关系

温度/℃	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40
压力（表压）/MPa	0.68	0.78	0.88	10.5	1.17	1.37	1.57	1.76	1.96	2.21	2.45

表 7.5-25　各种气瓶颜色和标志的规定

气瓶的用途	漆　色	标字的内容	标字的颜色	线条的颜色
氮	黑　色	氮	黄　色	棕　色
氨	黄　色	氨	黑　色	—
乙炔	白　色	乙炔	红　色	—
氢	深绿色	氢	红　色	—
硫化氢	白　色	硫化氢	红　色	红　色
空气	黑　色	压缩空气	白　色	—
二氧化硫	黑　色	二氧化硫	白　色	黄　色
二氧化碳	黑　色	二氧化碳	黄　色	—
氧	浅蓝色	氧	黑　色	—
氯	保护色	—	—	绿　色
光气	保护色	—	—	红　色
其他一切非可燃气体	黑　色	气体名称	黄　色	—
其他一切可燃气体	红　色	气体名称	白　色	—

3.1.5　高压气体减压器的安全使用规则

减压器是调节气瓶压力和保证稳压供气不可缺少的重要附件。用于氧气和各种可燃气体气瓶的减压器可能发生着火、爆燃和器体熔孔烧损等事故，因此，必须正确操作和使用维护。

各种减压器的外表都应漆上和气瓶相同的颜色标志。对于各类气瓶还用不同的螺纹连接（如左旋或右旋螺纹）和连接方法来加以区别。常用减压器的型号和技术性能见表7.5-26。

氧气减压器（俗称氧气表）的安全要求见表7.5-27。

表 7.5-26　减压器型号及性能

型　号	名　称	最高工作压力/MPa	调节范围/MPa	公称流量/$m^3 \cdot h^{-1}$	出口孔径/mm	配套压力表规格/MPa	连接螺纹	质量/kg	用途
YQY06	单级氧气减压器	150	0.1～1	30	6	0～25/0～1.6	G5/8″	4	瓶用
YQY07	单级氧气减压器	150/10	0.1～1.25	40	5	0～25/0～25	G5/8″	2	
YQY08	单级氧气减压器	150/2	0.1～2	50	3	0～25/0～4	G5/8″	2	
SJ7-10	双级氧气减压器	150/25	0.1～2	80	9	0～25/0～60	G1	9	管道用
QY9-25/10	单级氧气减压器	25/10	0.1～1	40	5	-/0～1.6	G5/8	1.5	
QY11-150/15	双级氧气减压器	150/15	0.1～1.5	100	6	0～25/0～1.6	G5/8	5.8	
YQE-03	单级乙炔减压器	16/1.5	0.1～1.5	5	4	0～2.5/0～0.25	—	2	瓶用

表 7.5-27 氧气减压器的安全要求

氧气减压器的安全要求	1）安装氧气表之前要稍打开氧气瓶阀，吹除瓶嘴污物，以防灰尘和水分带入氧气表。气瓶阀嘴开启时不能朝人体方向 2）装卸氧气表时必须注意防止管接头丝扣滑牙，以免旋装不牢而射出 3）拧开氧气瓶阀和氧气表时，动作必须缓慢，否则，高压气流的冲击将使表体局部空间的气体受绝热压缩而温度剧增。同时，高速气流的冲击波也会作用于表体内表面，由机械能转变为热能，加上高压纯氧的助燃作用，完全有可能使橡胶隔膜、衬垫等材料着火烧坏，甚至使铜、铁和钢等金属发生燃烧

氧气表在使用过程中应经常检查其性能是否正常，如发现有故障时应及时维修，切忌随便处理。氧气表和减压器常见故障及其防止措施见表 7.5-28。

表 7.5-28 氧气表和减压器常见故障及防止措施

常见故障	故障原因及部位	防止措施及修理
减压器漏气	减压器连接部分漏气，螺纹配合松动或垫圈损坏	1）拧紧螺丝 2）更换新垫圈
	安全阀漏气 活门垫损坏或弹簧变形	1）调整弹簧 2）更换活门垫
	减压器上盖薄膜损坏或未拧紧，造成漏气	1）更换橡皮薄膜 2）拧紧丝扣
减压器表针爬高（自流）	调节螺杆松开后，气体继续流出，低压表针继续上升，原因是： 1）活门或门座上有污物 2）活门密封垫或活门座不平（有裂纹） 3）回动弹簧损坏、压紧力不够	将活门螺丝松开，取出活门进行检查，按损坏情况处理 1）将活门污物去净 2）将活门不平处用细砂布磨平，如果有裂纹要换新活门 3）调整弹簧长度
打开氧气瓶时，高压表针已表示有氧，但低压表不动作或动作不灵敏	调节螺杆已拧到底，但工作压力不升或升得很少，其原因是调压弹簧损坏或传动杆弯曲	拆开减压器盖，更换调压弹簧和传动杆
	工作时氧气压力下降，或表针有剧烈的跳动，说明减压器内部冻结	用热水加热解冻后，把水吹干
	低压表已升到工作压力，但使用时突然下降，说明氧气阀门没全打开	继续打开氧气阀门

3.1.6 气焊与气割工具安全要求

焊割炬安全要求见表 7.5-29。

氧气与乙炔胶管使用安全要求见表 7.5-30。

表 7.5-29 焊割炬安全要求

射吸式焊炬点火前检验	焊割炬点火前必须先检查其射吸性能是否正常，以及焊炬各连接部位、调节手轮的针阀等处是否漏气。检查方法是将氧气胶管紧固在焊炬的氧气接头上，接通氧气后先开启乙炔调节手轮，然后开启氧气调节手轮，并用手指按在乙炔接头上，若感到有一股吸力，则表明其射吸性能是正常的。如果没有吸力，甚至氧气从乙炔接头中倒流出来，则说明射吸性能不正常，必须进行修理，否则严禁使用。射吸性能检查正常后，把乙炔胶管连接在乙炔接头上，检查焊炬是否漏气。检查方法可以将焊炬浸入干净的水中，或在各连接部位、气阀、焊嘴及射吸管等处涂抹肥皂水，然后开启调节手轮送入氧气和乙炔气，如有不严密处将会发现有气泡冒出
焊割炬使用安全要求	点火时应先开启乙炔调节手轮，点燃乙炔并立即开启氧气调节手轮，调整火焰。也可以在点火时先把氧气调节手轮稍微开启，接着开启乙炔调节手轮并点火，然后再开氧气调节手轮调整火焰。这种方法可消除冒黑烟的缺点，但焊炬一旦有堵塞时，氧气可能进入乙炔胶管形成回火爆炸条件。按安全操作要求，建议采用前一种点火方法 停止使用时，先关乙炔调节手轮，后关氧气调节手轮，以防止火焰倒袭和产生黑烟。若使用大号焊嘴的焊炬，在关火时，可先把氧气调节手轮开大一点，然后关乙炔调节手轮，最后关闭氧气调节手轮，以保持气体有较高流速，有利于避免回火 焊工在操作中如需调整乙炔和氧气压力或流量，必须先熄灭火焰停止焊接，待处理后再重新点火。禁止带火焰进行调整处理，防止因发生器的压力和流量发生波动，引起回火 焊炬停止使用后，应挂在适当的地方，或拆下胶管，将焊炬存放在工具箱内。禁止为使用方便而不拆下胶管，将焊炬、胶管和气源作永久性连接，随便放在容器、管道里或锁在工具箱内。焊接操作现场的事故教训表明，这种做法使得点火时经常发生回火，或在容器、工具箱内发生爆炸，其原因是：焊炬阀门关闭不严或焊炬漏气，切不断气源，使得氧气和乙炔气相互窜通，导致一是氧气和乙炔混合气外溢滞留在周围局部空间；二是乙炔进入氧气胶管或氧气进入乙炔胶管，加上点火时未排放胶管内滞留的混合气而发生事故
避免发生回火	引起回火的主要原因有： 1）焊嘴过热使得混合气受热膨胀，压力增高，流动阻力增大。焊嘴温度超过400℃时，部分混合气能在焊嘴内自燃 2）焊嘴或焊炬的气体通道被炭质微粒、乙炔的杂质或熔化金属飞溅物堵塞 3）胶管受压、阻塞或打折等，使焊嘴出口处的气体流速降低 4）焊嘴选用不当 5）如果操作中发生回火，应急速关闭乙炔调节手轮，再关闭氧气调节手轮。待回火熄灭后，将焊嘴放入水中冷却，然后打开氧气调节手轮吹除焊炬内的烟灰，再重新点火。此外，在紧急情况下可拔去乙炔胶管，为此，一般要求氧气胶管必须与焊炬接头连接牢固，而乙炔胶管与接头的连接不宜太紧，以不漏气并容易插上又容易拔下为准



表 7.5-30 氧气与乙炔胶管使用安全要求

胶管爆炸着火事故的原因	1）胶管里形成了乙炔与氧气，或乙炔与空气的混合气 2）回火的火焰烧进胶管里 3）由于磨损、挤压、腐蚀或保养维护不善，使胶管老化变质、强度降低或漏气 4）胶管的制造质量不符合安全要求 5）氧气胶管沾有油脂，或用高速气流而产生的静电火花
胶管防爆与防火措施	保存和使用胶管时必须注意维护，保持胶管的清洁和不受损坏。例如避免受阳光照射、雨雪浸淋，防止与能使胶管损坏的酸、碱、油类及其他有机溶剂等物质接触。存放温度为 15～40℃，距离热源不少于 1 m。胶管在保存和使用时如果维护不善，或因使用日久而老化脆硬，这时胶管内的硫磺质会被分解析出，常常因此引起回火爆炸事故 新胶管在使用前，必须先把胶管内壁的滑石粉吹除干净，防止焊割炬的通道被堵塞。在使用中应避免受外界挤压和机械损伤，不得将管身折叠 氧气与乙炔胶管不得相互混用和代用，不得用氧气吹除乙炔胶管堵塞物。随时检查和消除焊割炬的漏气、堵塞等缺陷，防止在胶管内形成氧气与乙炔混合气。 如果发生回火倒燃进入氧气胶管时，则该胶管不可继续使用，必须换新。因为回火常常将胶管的内胶层烧坏，压缩纯氧又是强烈氧化剂，若再继续使用，必将失去原来正常的安全性 气割操作需要较大的氧气输出量，因此，与氧气表高压端连接的气瓶（或氧气管道）阀门应全打开，以便保证提供足够的流量和稳定的压力。防止低压表虽然已达到工作压力，但使用时压力突然下降而发生回火，并可能倒燃进入氧气胶管，引起爆炸

3.2 电焊安全

（1）电焊操作的不安全因素

电焊操作时接触电的机会很多，如移动和调节电焊设备及其他电器（焊钳或焊枪、电缆、焊件和工作台等），在更换焊条时，焊工的手要直接触及焊条。电焊机的空载电压一般都超过安全电压，而且焊接电源与 380/220 V 的电力网路连接，一旦设备发生故障（如弧焊变压器初级绕组或直流弧焊发电机的绝缘损坏等），较高的电压就会出现于焊钳或焊枪、焊件及焊机外壳上。因此，触电是电焊操作的主要危险。尤其是在容器、管道、船舱、锅炉里和钢架上进行操作，周围都是金属导体，其触电危险性更大。

电焊操作还可能发生电气火灾、爆炸和灼烫等事故。焊机和线路的短路、超负荷等能引起电气火灾；在操作地点附近或高空作业点下方存放有可燃易爆物品时，可能引起火灾和爆炸；特别需要强调指出，燃料容器和管道的检修焊补大多采用电弧焊，当防爆措施不当时，容易发生火灾、爆炸和灼烫等严重事故；操作过程中的火花飞溅也会造成灼烫事故。

登高作业的电焊操作，除可能发生直接从高空坠落的伤亡事故外，还可能发生因触电失控，从空中坠落的二次事故。

（2）电焊的触电事故和触电危险性

电焊的触电事故和触电危险性见表 7.5-31。

表 7.5-31 电焊的触电事故和触电危险性

电流对人体的作用	电击是指电流通过人体内部，破坏心脏、肺部及神经系统的功能。电伤是电流的热效应、化学效应或机械效应对人体的伤害 通过人体的电流越大，引起心室颤动所需的时间越短，致命危险越大。能使人感觉到的最小电流称为感知电流，工频交流约 1 mA，直流约 5 mA；人触电后自己能摆脱电源的最大电流称为摆脱电流，交流约 10 mA。直流约 50 mA；在较短时间内危及生命的电流，称为致命电流，交流约 50 mA。在有防止触电的保护装置条件下，人体允许电流一般可按 30 mA 考虑
电焊发生触电事故的原因	我国目前生产的弧焊焊机的输入电压为 380/220 V，空载输出电压为 40～90 V。过高的空载电压虽然有利于引弧，但对焊工操作的安全不利，氢原子焊机的空载电压为 300 V，工作电压为 100 V；等离子切割电源的空载电压高达 300～450 V。工频安全电压为 36 V，弧焊焊机的空载电压就可能发生触电事故 焊接发生直接触电事故的原因主要如下。 1）在更换焊条、电极和焊接操作中，手或身体某部接触到电焊条、焊钳或焊枪的带电部分，而脚或身体其他部位对地和金属结构之间无绝缘防护。在金属容器、管道、锅炉里，船舱或金属结构上，或当身上大量出汗、在阴雨天、潮湿地点焊接，尤其容易发生这种触电事故 2）在接线、调节焊接电流和移动焊接设备时，手或身体某部碰触到接线柱、极板等带电体而触电 3）在登高焊接时触及低压线路或靠近高压网路引起的触电事故等 焊接发生间接电击事故的原因主要如下。 1）电焊设备的罩壳漏电，人体碰触罩壳而触电。在下列情况下可能造成电焊机罩壳漏电。由于线圈潮湿导致绝缘损坏；焊机长期超负荷运行或短路发热致使绝缘降低、烧损而漏电；焊机的安装地点和方法不符合安全要求，遭受震动、碰击，而使线圈或引线的绝缘受到机械性损伤，并与铁心和罩壳短路；维护检修不善或工作现场混乱，致使小金属物如铁丝、铁屑、铜线或小铁管头之类，一端碰到接线柱、电线头等带电体，另一端碰到铁心或罩壳而漏电 2）由于电焊设备或线路发生故障而引起的事故。例如焊机的火线与零线错接，使外壳带电，人体碰触壳体而触电 3）电焊操作过程中，人体触及绝缘破损的电缆、破裂的胶木闸盒等 4）由于利用厂房的金属结构、管道、轨道、天车吊钩或其他金属物件搭接作为焊接回路而发生的触电事故



(3) 电焊引起火灾与爆炸事故的原因

1) 电焊设备和线路出现危险温度　危险温度是电气设备（如弧焊变压器）和线路过热造成的，这种过热主要来源于电流产生的热量。电焊设备由于存在着导体电阻和接触部位电阻的电阻热，以及利用电磁感应进行工作的电焊设备，由于交变磁场在铁磁材料中产生磁滞损耗和涡流损耗，使温度升高。此外当电焊设备绝缘质量降低时，通过绝缘材料的泄漏电流增加，也会导致绝缘材料温度升高。对结构性能正常和正确运行的电焊设备来说，稳定运行时，即发热与散热平衡时，其最高温度与最高温升（即最高温度与周围环境温度之差）都不会超过某一允许范围，例如塑料绝缘线的最高温度一般不得超过70℃；橡胶绝缘线的最高温度一般不得超过65℃。这就是说，电焊设备正常的发热是允许的。但是当其正常运行遭到破坏时，发热量增加，温度升高，在一定条件下可以引起火灾。

引起电焊设备过度发热大致有以下几种原因。

① 短路　发生短路时，线路中的电流比正常值要增加几倍甚至几十倍，而产生的电阻热量又和电流的平方成正比，使得温度急剧上升，大大超过允许的温度范围。不仅能使绝缘材料燃烧，甚至能使金属熔化。

② 超负荷　允许连续通过而不致使导线过热的电流量，称为导线的安全电流。超过安全电流值，则称为导线超负荷。它将使导线过热而加速绝缘层老化，甚至变质损坏引起短路着火事故。

③ 接触电阻过大　接触部位（如导线与导线的连接，或导线与接线柱的连接）是电路中的薄弱环节，是发生过热的一个重点部位。由于接触表面粗糙不平、有氧化皮或连接不牢等造成的接触不良，将会引起局部接触电阻过大而产生过热，使得导线、电缆的金属芯变色甚至熔化，并能引起绝缘材料、可燃物质或积留的可燃性灰尘燃烧。

④ 其他原因　如通风不好、散热不良等造成焊机过热；还可能弧焊变压器的铁心绝缘损坏或长时间过电压，使涡流损耗和磁滞损耗增加而引起过热，等等。

2) 电火花和电弧　电火花是电极间击穿放电的结果，电弧是电极间持久有力的放电现象。

电火花一般具有较高温度，电弧的温度高达4 000～8 000 K，因此，电火花和电弧不仅能引起可燃物燃烧，还能使金属熔化、飞溅，构成危险的火源。在有爆炸着火危险的场所，或在登高作业点的地面上存放有可燃易爆物品等情况下，电火花和电弧是十分危险的因素。

电火花大体包括工作火花和事故火花两类。工作火花是电焊设备正常工作时或正常的焊接操作过程中产生的火花，如直流弧焊发电机电刷与整流子滑动接触处的火花，闪光对焊时的火花等。事故火花包括线路或设备发生故障时出现的火花，如由于焊接电缆连接处松动而产生的火花等。

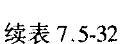
在电焊操作过程中还会由于熔融金属的飞溅，以及电气火灾与爆炸而发生灼烫事故。

(4) 电焊设备和操作的安全措施

在进行电弧焊操作时应采取的安全措施列于表7.5-32。

表7.5-32　电焊设备工具和操作安全

项　目	安　全　措　施
焊接电源	1) 所有交流、直流电焊机的外壳，均必须装设保护性接地或接零装置 2) 焊机的接地装置可用铜棒或无缝钢管作接地极，打入地下深度不小于1 m，接地电阻小于4 Ω 3) 焊机的接地装置可以广泛利用自然接地极，例如铺设于地下的属于本单位独立系统的自来水管，或与大地有可靠连接的建筑物的金属结构等。但氧气和乙炔管道以及其他可燃易爆用品的容器和管道，严禁作为自然接地极 4) 自然接地极电阻超过4 Ω时，应采用人工接地极 5) 弧焊变压器的二次线圈与焊件不应同时存在接地（或接零）装置 6) 所有电焊设备的接地（或接零）线，不得串联接入接地体或零线干线 7) 连接接地线或接零线时，应首先将导线接到接地体上或零线干线上，然后将另一端接到电焊设备外壳上，拆除接地线或接零线的顺序则恰好与此相反，应先将接地（或接零）线从设备外壳上拆下，然后再解除与接地体或接零干线的连接，不得颠倒顺序 8) 焊机工作负荷不应超出铭牌规定。即在允许的负载持续率下工作，不得任意长时间超载运行。焊机应按时检修，保持绝缘良好
焊接电缆	1) 应具备良好的导电能力和绝缘外层。一般是用纯铜芯线外包胶皮绝缘套制成。绝缘电阻不得小于1 MΩ 2) 应轻便柔软、能任意弯曲和扭转、便于操作。因此电缆芯必须用多股细线组成，如果没有电缆，可用相同导电能力的硬导线代替，但在焊钳连接端至少要有2～3 m长的软线连接，否则不便操作 3) 焊接电缆应具有较好的抗机械性损伤能力、耐油、耐热和耐腐蚀等性能，以适应焊接工作的特点 4) 焊机与配电盘连接的电缆线，由于其电压较高，除应保障良好绝缘外，长度以不超过2～3 m为宜，如确需用较长的导线时，应采取间隔安全措施，即应离地面2.5 m以上沿墙用瓷瓶布设。严禁将电源线拖在工作现场地面上 5) 焊机与焊钳（枪）和焊件连接导线的长度，应根据工作时的具体情况决定。太长会增大电压降，太短则不便于操作，一般以20～30 m为宜 6) 焊接电缆的截面积应根据焊接电流的大小，按规定选用，以保证导线不致过热而损坏绝缘层 7) 焊接电缆应使用整根的，中间不应有接头。如需用短线接长时，则接头不应超过2个。接头应用铜导体，需连接坚固可靠，并保证绝缘良好 8) 严禁利用厂房的金属结构、管道、轨道或其他金属物搭接起来作为导线使用 9) 不得将焊接电缆放在电弧附近或炽热的金属旁，避免高温烧坏绝缘层。横穿道路、马路时应加遮盖，避免碾压磨损等 10) 接电缆的绝缘应定期进行检查，一般为半年检查一次



续表 7.5-32

项　目	安　全　措　施
安全操作要点	1）先安全检查后工作：检查接地或接零装置、绝缘及接触部位是否完好可靠等 2）加强个人防护：干燥完好的工作服、皮手套、绝缘鞋等 3）更换焊条时一定要戴皮手套，禁止用手和身体随便接触二次回路的导电体，身体出汗衣服潮湿时，切勿靠近带电的钢板或坐在焊件上工作 4）在金属容器内或在金属结构上焊接时，触电的危险性最大，必须穿绝缘鞋、戴皮手套、垫上橡胶板或其他绝缘衬垫，以保障焊工身体与焊件间绝缘。并应设有监护人员，随时注意操作人员的安全动态，遇有危险时立即切断电源进行救护 5）下列操作应在切断电源开关后进行：改变焊机接头、改接二次回路、搬动焊机、更换熔丝、检修焊机

3.3　特殊焊接作业安全

3.3.1　燃料容器焊补安全技术

燃料容器（桶、罐等）与管道因受腐蚀或因材料和制造工艺有缺陷，在使用中可能产生穿孔和裂缝而需焊补。这类焊接操作往往任务急、时间紧，需在处于易燃易爆易中毒的情况下进行，有时甚至还要在高温高压下进行抢修焊补，稍有疏忽，就极易发生爆炸、火灾和中毒事故。某些情况下这类事故往往可引起整座厂房或整个燃料供应系统的爆炸着火。后果极为严重。

（1）置换动火与带压不置换动火

燃料容器、管道的焊补，目前主要有置换动火与带压不置换动火两种方法。

1）置换动火　置换动火就是在焊接动火前实行严格的惰性介质置换，将原有的可燃物排出，使设备管道内的可燃物含量达到安全要求，经确认不会形成爆炸性混合物后，才动火焊补的方法。

置换动火是人们从长期生产实践中总结出来的经验，它将爆炸的条件减到最小，是比较安全妥善的办法。在设备、管道的生产检修工作中一直被广泛采用。但是采用置换法时，设备或管道需暂停使用；需要用惰性气体或其他介质进行置换；置换过程中要不断取样分析，直至合格后才能动火；动火以后还要再置换。这样的方法手续多，置换作业耗费时间长，影响生产。此外，如系统设备管道中弯头死角多，往往不易置换干净而留下事故隐患。若置换不彻底，仍有发生爆炸的危险。

2）带压不置换动火　燃料容器的带压不置换动火，目前主要用于可燃液体和可燃气体容器管道的焊补。它要求严格控制氧的含量，使工作场所不能形成达到爆炸范围的混合气，在燃料容器或管道处于正压状态条件下进行焊补。通过对含氧量的控制，使可燃气体含量大大超过爆炸上限，然后让它以稳定不变的速度，从设备或管道的裂缝处逸出，与周围空气形成一个燃烧系统。点燃可燃气体，并以稳定的条件保持这个燃烧系统，控制气体在燃烧过程中不致发生爆炸。

带压不置换法不需要置换原来的液体或气体，有时可以在不停车的情况下进行（如焊补气柜）。只要有专人负责控制关键岗位气体中氧的含量和压力符合要求并保持稳定即可。它的手续少，作业时间短，有利于生产。但是它的应用有一定的局限性，只能在连续保持一定压力的情况下进行。另外，这种方法中能在设备管道外面动火，如果需要在设备管道内动火，仍必须采取置换作业法。

（2）燃料容器与管道焊补时发生爆炸火灾事故的一般原因

燃料容器与管道的检修焊补，发生爆炸火灾事故的原因如下。

1）焊接动火前对容器内的可燃物置换不彻底，取样化验和检测数据不准确，取样化验检测部位不适当等，造成在容器管道内或动火点的周围存在着爆炸性混合物。

2）在焊补操作过程中，动火条件发生了变化未及时引起注意。

3）动火检修的容器未与生产系统隔绝，致使易燃气体或蒸汽互相串通，进入动火区段；或是一面动火，一面生产，互不联系，在放料排气时遇到火花。

4）在尚具有燃烧和爆炸危险的车间、仓库等室内进行焊补检修。

5）焊接未经安全处理或未开孔洞的密封容器。

（3）置换动火安全措施

置换动火具有较好安全性，并有长期积累的丰富经验，所以一直被广泛地应用。但是如果系统和设备的弯头、死角支叉多，往往不易置换干净而留下隐患，置换的不彻底及其他因素也还是有发生爆炸的危险。为确保安全，必须采取下列安全技术措施，才能有效防止爆炸着火事故的发生。

1）可靠隔离　燃料容器与管道停工后，通常采用盲板将与之连接的出入管路截断，使焊补的容器管道与生产的部分完全隔离。为了有效防止爆炸事故的发生，盲板必须保证严密不漏气，还应保证能耐管路的工作压力，避免盲板受压破裂。为此，在盲板与阀门之间应加设放空管或压力表，并派人看守。否则应将管路拆卸一节。有些短时间的动火检修工作可用水封切断气源，但需有专人在现场看守水封溢流管的溢流情况，防止水封失效。可靠隔离的另一种措施是在厂区或车间内划定固定动火区。凡可拆卸并有条件移动到固定动火区焊补的物件，必须移到固定动火区内进行，从而尽可能减少在防爆车间和厂内的动火工作。固定动火区必须符合下列防火与防爆要求。

① 无可燃物管道和设备，并且周围距易燃易爆设备管道 10 m 以上。

② 室内的固定动火区与防爆的生产现场要隔开，不能有门窗、地沟等串通。

③ 要常备足够数量的灭火工具和设备。

④ 固定动火区内禁止使用各种易燃物质，如易挥发的清洗油、汽油等。

⑤ 周围要划定界线，并有“动火区”字样的安全标志。

⑥ 在未采取可靠的安全隔离措施之前，不得动火焊补检修。

2）严格控制可燃物含量　焊补前，通常采用蒸汽煮并用置换介质吹净等方法将容器内部的可燃物质和有毒性物质置换排出。

在置换过程中要不断取样分析，严格控制容器内的可燃物含量，必须达到合格量，以保证符合安全要求，这是置换动火焊补防爆的关键。在可燃容器上焊补，操作者不得进入容器内，其内部的可燃物含量不得超过爆炸下限的$\frac{1}{4}\sim\frac{1}{3}$；如果需进入容器内操作，除保证可燃物不得超过上述的含量外，由于置换后的容器内部是缺氧环境，所以还应保证含氧量为 18% ~ 21%，毒物含量应符合“工业企业设计卫生标准”的规定。



常用的置换介质有氮气、二氧化碳、水蒸气或水等。置换方法应考虑到被置换介质与置换介质之间的比例关系，当置换介质比被置换介质的比例大时，应由容器的最低点送进置换介质，由最高点向室外放散。以气体作为置换介质时，其需用量不能按经验，以超过被置换介质容积的几倍来计算。因为某些被置换的可燃气体或蒸汽具有滞留性质，在同置换气体比例相差不大时，还应注意到置换不彻底的可能性及两相间的互相混合现象。有些情况下必须采用加热气体介质来置换，才能把潜存在容器内部的易燃易爆混合气体赶出来。因此，置换作业必须以气体成分化验分析达到合格为准。容器内部气体的取样部位应是具有代表性的部位，并应以动火前取得气体样品分析值是否合格为准。以水作为置换介质时，将容器灌满即可。

未经置换处理，或虽已置换但尚未分析化验气体成分是否合格的燃料容器，均不得随意动火焊补。否则易造成事故。

3) 严格清洗工作　置换动火前，设备管道的里外都必须仔细清洗。有些可燃易爆介质被吸附在容器、管道内表面的积垢或外表面的保温材料中，由于温差和压力变化的影响，置换后也能陆续散发出来，导致操作中气体成分发生变化，即动火条件发生变化而造成爆炸失火事故。油类容器、管道的清洗，采用火碱清洗时，应先在容器中加入所需数量的清水，然后将火碱分批逐渐加入，同时缓慢搅动，待全部碱片均加入溶解后，方可通入水蒸气煮沸。必须注意通入水蒸气铁管的末端应伸至液体的底部，以防通入水蒸气后有碱液泡沫溅出。这项操作不得先将碱片预放在设备管道内，然后再加入清水，尤其是热水，因为碱片溶解时，会产生大量的热，碱液涌出设备外，往往使操作者受伤。对有些油类容器如汽油桶，可以直接用蒸汽流吹洗，2 000 L以内的汽油容器的吹洗时间不得少于2 h。

酸性容器器壁上的污物和残酸要用木质、黄铜（含铜70%以下）、铝质刀或刷、钩等简单工具手工刮除。

装盛其他介质的设备管道的清洗，可以根据积垢的性质，采取酸性或碱性溶液。例如清除铁锈等，用浓度为8%～15%的硫酸比较合适，硫酸能使各种形式的铁锈都转变为硫酸亚铁。

为了提高清洗工作的效率和减轻体力劳动，可以采用水力机械、风动和电动机械以及喷丸等清洗除垢法。

在无法清洗的特殊情况下，在容器外焊补动火时应尽量多灌装清水，以缩小容器内可能形成爆炸性混合物的空间。容器顶部须留出与大气相通的孔，以防止容器内压力的上升。在动火时应当保证不间断地进行机械通风换气，以稀释可燃气体和空气的混合物。

国外有的采用“惰性气体防护维修”法。将氮的泡沫吹入已置换的容器内，使容器的内侧表面覆盖上厚厚的一层，这样便可在容器未经清洗干净的情况下进行焊接或切割等高温作业，能够保证在设备外部进行操作时的安全，从而大大节约了时间。

4) 空气分析和监视　在置换作业过程中和检修动火开始前0.5 h内，必须从容器内外的不同地点取混合气样品进行化验分析，检查合格后才能开始动火焊补。在动火过程中，还要用仪表监视。由于可能从保温材料中陆续散发出可燃气体或虽经清水或碱水清洗，但由于焊接的热量把底脚泥或桶底卷缝中的残油赶出来，蒸发成可燃气，所以焊补过程中，要继续用仪表监视，仪表监视可及时发现可燃气浓度的上升，达到危险浓度时，要立即关火，再次清洗直到合格为止。

5) 增加泄压面积　动火焊补时应打开容器的人孔、手孔、清扫孔和放散管等。严禁焊补未开孔洞的密封容器。

进入容器内采用气焊动火时，点燃和熄灭焊枪的操作均应在容器外部进行，防止过多的乙炔气聚集在容器内。

6) 安全组织措施

① 在检修动火前必须制定计划。计划中应包括进行检修动火作业的程序、安全措施和施工草图。施工前应与生产人员和救护人员联系并应通知厂内消防队。

② 在工作地点周围10 m内应停止其他用火工作，并将易燃物品移到安全场所。电焊机二次回路线及气焊设备乙炔胶管要远离易燃物，防止操作时因线路发生火花或乙炔胶管漏气造成起火。

③ 检修动火前除应准备必要的材料、工具外，还必须准备好消防器材。在黑暗处所或夜间工作，应有足够的照明，并准备好带有防护罩的手提低压（12 V）行灯等。

(4) 不置换动火安全措施

为确保带压不置换动火的安全性，操作时必须注意下列几点。

1) 严格控制氧含量　带压动火焊补之前，必须进行容器内气体成分的分析，以保证其中氧的含量不超过安全值。所谓安全值就是在混合气中，当氧的含量低于某一有限值时，不会形成达到爆炸极限的混合气。氧含量的这个安全值也称极限含氧量，通过控制这一指标，可使焊补操作得以安全进行。例如在与空气的混合物中，氢气的爆炸下限为4.0%，上限为75%。在75%时，空气占25%，氧的含量为5.2%。也就是当氧的含量小于5.2%时就不会形成达到爆炸极限的混合气。不过爆炸性混合气在不同的管径、压力和温度等条件下，有不同的爆炸极限范围，不能把常温、常压下测得的数据或理论计算的数据应用于高压情况下，同时尚需考虑仪表和检测的误差等。目前有的部门规定氢气、一氧化碳、乙炔和发生炉煤气等的极限含氧量以不超过1%作为安全值，这个数据具有一定的安全系数。

在动火前和整个焊补操作过程中，都要始终稳定控制系统中含氧量低于安全数值。这就要求生产负荷要平衡，前后工段要加强统一调度，关键岗位要有专人监测。并要加强气体成分分析（可安置氧气自动分析仪），当发现系统中氧含量增高，应尽快找出原因及时排除。氧含量超过安全值时应立即停止焊接。

2) 正压操作　动火前和在整个焊补操作过程中，容器必须连续保持稳定的正压，这是带压不置换动火安全操作的关键。一旦出现负压，空气进入动火的容器，就难免会发生爆炸。

压力的大小应控制在不发生猛烈喷火为宜。因为焊补前要引燃从裂缝逸出的可燃气，形成一个稳定的扩散燃烧系统，如果压力太大即气体流速大，喷出的火焰就会很猛，焊条熔滴容易被气流吹走，给焊接操作造成困难。而且穿孔部位的钢板，在火焰高温作用下易于变形或发生熔孔扩大，从而喷出更大的火焰，造成事故。如果压力太小，易造成压力波动，会使空气渗入容器里，形成爆炸性混合气。因此，压力一般可控制在保持正压而不猛烈喷火为宜。

3) 严格控制动火点周围可燃气体的含量　无论在室内或室外进行容器的带压不置换动火焊补时，还必须分析动火点周围滞留空间的可燃物含量，以低于爆炸下限的$\frac{1}{4}$～$\frac{1}{3}$为合格。取样部位应考虑到可燃气的性质（如密度、挥发性）和厂房建筑的特点等因素而正确选择。应注意检测数据的准确性和可靠性，确认安全可靠时再动火焊补。

4) 焊接操作的安全要求

① 在焊补前就需引燃从裂纹逸出的可燃气，在焊接时，焊工不可面对动火点，以免发生烧伤事故。

② 焊机的电流大小要预先调节好，特别是压力在0.1



MPa 以上和钢板较薄的容器，焊接电流过大容易熔扩穿孔，在介质的压力下将会产生更大的孔和裂纹，而造成事故。

③ 遇到动火条件有变化，如系统内压力急剧下降到所规定的限度，或氧含量超过安全值等，都要立即停止动火，待查明原因，采取相应对策，方可再进行焊补。

④ 焊补过程中如果发生猛烈喷火，应立即采取消防措施。在火未熄灭前不得切断可燃气来源，也不得降低系统的压力，以防容器吸入空气形成爆炸性混合气。

⑤ 焊工要有较高的技术水平，焊接操作要均匀、迅速。焊工还需预先经过专门训练。

燃料容器的带压不置换动火是一项新技术，爆炸因素比置换动火时变化多，稍不注意就会给国家财产和人身安全带来严重后果。它要求必须做好严密的组织工作，要有专人进行严肃、认真的统一指挥。值班调度、有关车间和工段的生产负责人和技术人员要在现场参加工作。控制系统压力和氧含量的岗位以及化验分析等要有专业人员负责，消防部门应密切配合。在企业管理健全、安全工作好、技术力量强的工厂企业可以试行。对企业管理不健全、安全工作基础差、技术力量不足的企业，特别是小型工厂企业，一般不宜采取这种方法。必须明确规定，在企业各有关部门未采取有效措施前，焊工不得擅自进行带压焊补操作。

3.3.2 登高焊割作业安全措施

焊工在离地面 2 m 以上的地点进行焊接与切割操作，即称为登高焊割作业。登高焊割作业的安全要求见表 7.5-33。

表 7.5-33 登高焊割作业的安全要求

对作业人员的要求	凡登高进行焊割操作和进入登高作业区域，必须戴好安全帽，使用标准的防火安全带，穿胶底鞋。安全带应紧固牢靠，安全绳长度不可超过 2 m，不得使用耐热性差的材料，如尼龙安全带等。登高焊割人员必须经过健康检查合格。患有高血压、心脏病、精神病和癫痫病等，以及医生证明不能登高作业者一律不准登高操作
对场地设施的要求	焊工登高作业时，应使用符合安全要求的梯子。梯脚需包橡皮防滑，与地面夹角不应大于 60°，上下端均应放置牢靠。使用人字梯时应将单梯用限跨铁勾挂住，使用夹角为 40° ± 5°。不准两人在一梯子上（或人字梯的同一侧）同时作业，不得在梯子上顶档工作。登高焊割作业的脚手板应事先经过检查，不得使用有腐蚀或机械损伤的木板或铁木混合板。脚手板单行人行道宽度不得小于 0.6 m，双程人行道宽度不得小于 1.2 m，上下坡度不得大于 1:3，板面要钉防滑条并装扶手。使用安全网时要张挺，不得留缺口，而且层层翻高。应经常检查安全网的质量，发现有损坏时，必须废弃并重新更换安全网
安全警示要求	在登高接近高压线或裸导线排，或距离低压线小于 2.5 m 时，必须停电并经检查确认无触电危险后，方允许操作。电源切断后，应在电闸上挂以“有人工作，严禁合闸”的警告牌。登高焊割作业应设有监护人，密切注意焊工的动态。采用电焊时，电源开关应设在监护人近旁，遇有危险征象时立即拉闸，并进行处理。登高作业时不得使用带有高频振荡器的焊机，以防万一触电，失足摔落。严禁将焊接电缆缠绕在身上，以防绝缘损坏的电缆造成触电事故
安全操作要求	登高焊割作业必须采取安全措施防止发生高处坠落、火灾、电击和物体打击等工伤事故。登高作业的焊条、工具和小零件等必须装在牢固无孔洞的工具袋内，工作过程及工作结束后，应随时将作业点周围的一切物件清理干净，防止落下伤人。可采用绳子吊运各种工具及材料，但大型零件和材料应用起重工具设备吊运。不得在空中投掷材料或物件，焊条头不得随意下扔，否则不仅可能砸伤、烫伤地面人员，甚至能引燃地面可燃物品 登高焊割作业点周围及下方地面上火星所及的范围内，应彻底清除可燃易爆物品。一般在地面 10 m 之内应用栏杆挡隔。工作过程中需有专人看火，要铺设接火盘接火。焊割结束后必须检查是否留下火种，确认合格后，才能离开现场 在 6 级以上的大风、雨天、大雪和雾天等条件下禁止登高焊割作业

编写：王智慧（北京工业大学）



第6章　标准与法规

1　概述

我国目前负责焊接标准化管理的主要技术机构为全国焊接标准化技术委员会。

全国焊接标准化技术委员会成立于1985年，由国家标准化管理委员会统一领导和管理，其机构代号为SAC/TC55。

根据国务院标准化行政主管部门的分工，全国焊接标准化技术委员会的主要包括如下工作任务。

1）负责焊接专业的标准化技术归口工作。

2）负责组织制定焊接标准体系。

3）提出焊接标准制、修订规划和计划。

4）组织标准计划项目的实施。

5）负责焊接标准的宣传、贯彻及实施。

6）提出焊接专业标准化成果评定意见和奖励建议。

7）代表我国承担与国际标准化组织对口的技术业务工作，对国际标准文件进行表态处理，审查我国提案，提出开展对外标准化交流的议案。

8）在产品质量监督检验、认证过程中，承担有关的标准化评估工作。

9）为行业提供相关的标准化信息服务。

全国焊接标准化技术委员会保持工作联络的国内外团体及组织有：ISO/TC44、中国焊接学会、中国焊接协会、全国无损检测标准化技术委员会、全国电焊机标准化技术委员会、全国金属与非金属覆盖层标准化技术委员会、全国气体标准化技术委员会等。

国际标准化组织（ISO）成立于1946年10月，并于1947年2月开始正式运行。其宗旨是在世界范围内促进标准化发展，便于国际间标准的协调、统一，发展在知识、科技和经济领域内的合作。主要工作内容包括：制定国际标准、协调世界范围的标准；组织成员国、各技术委员会的技术交流；与其他团体、机构在相关的专业领域内开展标准化合作等。

在ISO内部，焊接方面的标准化工作由“焊接及相关工艺技术委员会”（ISO/TC44）具体负责。ISO/TC44现阶段的主要业务范畴包括气焊、电弧焊、电阻焊、感应焊及相关工艺领域的国际标准制、修订。

ISO/TC44的秘书处设在法国巴黎。ISO/TC44现有65个成员国，其中正式成员（P成员）29个，通讯成员（O成员）36个。我国目前以P成员身份参加该技术委员会的活动。

ISO/TC44现设有两个工作组、八个分技术委员会（SC），各分技术委员会的分工情况见表7.6-1。

表7.6-1　ISO/TC44下属机构的分工

机构代号	归口范围	秘书处所在国
ISO/TC44/WG1	水下焊接	美国
ISO/TC44/WG2	弧焊设备	美国
ISO/TC44/SC3	焊接材料	瑞典
ISO/TC44/SC5	焊缝的试验、检验	美国
ISO/TC44/SC6	电阻焊	德国
ISO/TC44/SC7	术语及表示方法	英国
ISO/TC44/SC8	气焊	德国
ISO/TC44/SC9	健康及安全	美国
ISO/TC44/SC10	金属焊接领域内的统一要求	德国
ISO/TC44/SC11	人员认可	捷克
ISO/TC44/SC12	软钎焊及硬钎焊	英国

欧洲标准化委员会（CEN）成立于1961年，其总部设在比利时的布鲁塞尔。CEN的正式成员有欧共体的12个国家和欧洲自由贸易联盟的6个国家。东欧的一些国家则以观察成员身份参加CEN的活动。

作为区域性的标准化组织，CEN的主要工作任务之一就是制订欧洲标准（EN标准）。对于EN标准的审批、颁布，CEN做了较为特别的规定。CEN颁布的EN标准在其成员国内部享有特殊地位。CEN不负责任何EN标准的出版发行，EN标准一旦得到批准，CEN成员国必须在六个月之内将其作为国家标准颁布实施，同时必须撤消任何与之不符的本国标准。

在CEN内部，焊接领域的标准化工作由“焊接技术委员会”（CEN/TC121）归口负责。CEN/TC121成立于1987年，其秘书处设在丹麦。CEN/TC121下属机构的设置与ISO/TC44基本对应一致，许多项目在两个组织内同步开展。因此，在焊接领域内，相当数量的ISO标准在技术内容上与相应的EN标准是等同或等效的。

2　焊接标准体系现状

（1）我国焊接标准体系

我国标准分国家标准、行业标准、地方标准和企业标准四级。国家标准由国家质量监督检验检疫总局批准颁布，行业标准由各行业管理部门审批并报国家质量监督检验检疫总局备案，地方标准则由各地方政府的标准化机构管理负责，仅在其地方政府的管辖地域内实行。在我国的各级标准中，国家标准和行业标准占据着主导地位。

我国的焊接标准体系表制订于20世纪80年代初，80年代后期又做了修改。我国焊接标准体系在制订之初根据当时的条件，仅考虑了全国焊接标准化技术委员会归口范围领域内的国家标准和行业标准，因此焊接无损检测、热切割、焊接设备等类别的标准并未包括在其中。1994年在进行标准体系调整时，按照与国际接轨的原则并结合焊接专业特点，对焊接标准体系结构做了调整。调整后的体系表实际上包含了两部分，即通用部分和专用部分。通用部分具体包括适用范围广、跨行业应用的通用性国家标准和行业标准。专用部分则以那些适用范围相对较窄、仅针对某些行业或某类产品的焊接标准。我国现行通用性焊接标准体系如表7.6-2所示。

就我国现行的通用性焊接标准体系总体而言，体系结构的划分首先参照ISO的分类结构、并借鉴AWS及JIS的分类方法。体系中各类标准的发展尚不均衡，采标对象、采标方式及侧重点有所不同。符号代号、表示方法等基础部分的标准采用ISO标准的比例较高，而焊接材料、焊接工艺部分的标准则基本采用AWS及JIS标准，试验检验部分的标准采用了各国的同类标准。就采标方式而言，绝大多数标准等同（或修改）采用了对应的国外标准。



表 7.6-2　我国通用性焊接标准体系

标准类别	标 准 编 号	标 准 名 称
基础	GB/T 324—1988	焊缝符号表示法
	GB/T 985—1988	气焊、手工电弧焊及气体保护焊焊缝坡口基本形式和尺寸
	GB/T 986—1988	埋弧焊焊缝坡口的基本形式和尺寸
	GB/T 3375—1994	焊接术语
	GB/T 5185—1985	金属焊接与钎接方法在图样上的表示代号
	GB/T 6208—1995	钎料型号表示方法
	GB/T 6416—1986	影响钢熔化焊接头质量的技术因素
	GB/T 6417—1986	金属熔化焊焊缝缺陷分类及说明
	GB/T 6419—1986	潜水焊工考试规则
	GB/T 12467.1—1998	焊接质量要求　金属材料的熔化焊　第一部分：选择及使用指南
	GB/T 12467.2—1998	焊接质量要求　金属材料的熔化焊　第二部分：完整质量要求
	GB/T 12467.3—1998	焊接质量要求　金属材料的熔化焊　第三部分：一般质量要求
	GB/T 12467.4—1998	焊接质量要求　金属材料的熔化焊　第四部分：基本质量要求
	GB/T 12469—1990	焊接质量保证　钢熔化焊接头的要求和缺陷分类
	GB/T 14693—1993	焊接无损检测符号
	GB/T 15169—2003	钢熔化焊焊工技能评定
	GB/T 16672—1996	焊缝-工作位置-倾角和转角的定义
	GB/T 19419—2003	焊接管理—任务与职责
	GB/T 19418—2003	钢的弧焊接头-缺陷质量分级指南
	JB/T 3223—1996	焊接材料质量管理规程
	JB/T 6043—1992	金属电阻焊接头缺陷分类
	JB/T 6963—1993	钢制件熔化焊工艺评定
	JB/T 7949—1999	钢结构焊缝外形尺寸
熔焊材料	GB/T 983—1995	不锈钢焊条
	GB/T 984—2001	堆焊焊条
	GB/T 3669—2001	铝及铝合金焊条
	GB/T 3670—1995	铜及铜合金焊条
	GB/T 5117—1995	碳钢焊条
	GB/T 5118—1995	低合金钢焊条
	GB/T 5293—1999	埋弧焊用碳钢焊丝及焊剂
	GB/T 8110—1995	气体保护焊用碳钢、低合金钢焊丝
	GB/T 9406—1988	铜及铜合金焊丝
	GB/T 10044—1988	铸铁焊条及焊丝
	GB/T 10045—2001	碳钢药芯焊丝
	GB/T 10858—1989	铝及铝合金焊丝
	GB/T 12470—2003	埋弧焊用低合金钢焊丝和焊剂
	GB/T 13814—1992	镍及镍合金焊条
	GB/T 15620—1995	镍及镍合金焊丝
	GB/T 17493—1998	低合金钢药芯焊丝
	GB/T 17854—1999	埋弧焊用不锈钢焊丝及焊剂
	GB/T 17853—1999	不锈钢药芯焊丝
	JB/T 3168.1—1999	喷焊合金粉末技术条件
	JB/T 6964—1993	特细碳钢焊条



续表 7.6-2

标准类别	标 准 编 号	标 准 名 称
钎焊	GB/T 6418—1986	铜基钎料
	GB/T 10046—2000	银钎料
	GB/T 10859—1989	镍基钎料
	GB/T 13679—1992	锰基钎料
	GB/T 13815—1992	铝基钎料
	GB/T 15829.1—1995	软钎焊用钎剂　分类、标记与包装
	GB/T 15829.2—1995	软钎焊用钎剂　树脂类钎剂
	GB/T 15829.3—1995	软钎焊用钎剂　有机物类钎剂
	GB/T 15829.4—1995	软钎焊用钎剂　无机物类钎剂
	JB/T 6045—1992	硬钎焊用钎剂
试验检验	GB/T 1954—1980	镍铬奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法
	GB/T 2649—1989	焊接接头机械性能试验取样方法
	GB/T 2650—1989	焊接接头冲击试验方法
	GB/T 2651—1989	焊接接头拉伸试验方法
	GB/T 2652—1989	焊缝及熔敷金属拉伸试验方法
	GB/T 2653—1989	焊接接头弯曲及压扁试验方法
	GB/T 2654—1989	焊接接头及堆焊金属硬度试验方法
	GB/T 2655—1989	焊接接头应变时效敏感性试验方法
	GB/T 2656—1981	焊接接头和焊缝金属疲劳试验方法
	GB/T 3323—1987	钢熔化焊对接接头射线照相及质量分级
	GB/T 3731—1983	涂料焊条效率，金属回收率和熔敷系数的测定
	GB/T 3965—1995	熔敷金属中扩散氢测定方法
	GB/T 4675.1—1984	焊接性试验　斜Y形坡口焊接裂纹试验方法
	GB/T 4675.2—1984	焊接性试验　搭接接头（CTS）焊接裂纹试验方法
	GB/T 4675.3—1984	焊接性试验　T形接头焊接裂纹试验方法
	GB/T 4675.4—1984	焊接性试验　压板对接（FISCO）焊接裂纹试验方法
	GB/T 4675.5—1984	焊接性试验　焊接热影响区最高硬度试验方法
	GB/T 7032—1988	T形接头弯曲试验方法
	GB/T 8619—1988	钎缝强度试验方法
	GB/T 9446—1988	焊接用插销冷裂纹试验方法
	GB/T 9447—1988	焊接接头疲劳裂纹扩展速率试验方法
	GB/T 11345—1989	钢焊缝手工超声波探伤方法及等级分类
	GB/T 11363—1989	钎焊接头强度试验方法
	GB/T 11364—1989	钎料铺展性及填缝性试验方法
	GB/T 12605—1990	钢管环缝熔化焊对接接头射线透照工艺和质量分级
	GB/T 13450—1992	对接接头宽板拉伸试验方法
	GB/T 13816—1992	焊接接头脉动拉伸疲劳试验方法
	GB/T 13817—1992	刚性拘束裂纹试验方法
	GB/T 15111—1994	点焊接头剪切拉伸疲劳试验方法
	GB/T 15747—1995	正面角焊缝接头拉伸试验方法
	GB/T 15830—1995	钢制管道对接环焊缝超声波探伤方法及检验结果的分级
	JB/T 3168.2—1999	喷焊合金粉末硬度粒度测定



续表 7.6-2

标准类别	标 准 编 号	标 准 名 称
试验检验	JB/T 3168.3—1999	喷焊合金粉末化学成分分析方法
	JB/T 4291—1999	焊接接头裂纹张开位移 COD 试验方法
	JB/T 5104—1991	焊接接头脆性破坏评定方法
	JB/T 6044—1992	焊接接头疲劳裂纹扩展速率侧槽试验方法
	JB/T 6061—1992	焊缝磁粉检验方法及缺陷磁痕的分级
	JB/T 6062—1992	焊缝渗透检验方法及缺陷痕迹的分级
	JB/T 6966—1993	钎缝外观质量检验
	JB/T 7520.1—1994	磷铜钎料化学分析方法　EDTA 容量法测定铜量
	JB/T 7520.2—1994	磷铜钎料化学分析方法　氯化银重量法测定银量
	JB/T 7520.3—1994	磷铜钎料化学分析方法　钒钼酸光度法测定磷量
	JB/T 7520.4—1994	磷铜钎料化学分析方法　碘化钾光度法测定碲量
	JB/T 7520.5—1994	磷铜钎料化学分析方法　次磷酸盐还原容量法测定锡量
	JB/T 7520.6—1994	磷铜钎料化学分析方法　丁二酮肟光度法测定镍量
	JB/T 7716—1995	焊接接头四点弯曲疲劳试验方法
	JB/T 7717—1995	焊接接头 ECO 试验方法
	JB/T 7853—1995	镍铬奥氏体不锈钢焊缝中铁素体数的测量
	JB/T 7902—1999	线型象质计
	JB/T 7948.1—1999	熔炼焊剂化学分析方法　重量法测定二氧化硅量
	JB/T 7948.2—1999	熔炼焊剂化学分析方法　电位滴定法测定氧化锰量
	JB/T 7948.3—1999	熔炼焊剂化学分析方法　高锰酸盐光度法测定氧化锰量
	JB/T 7948.4—1999	熔炼焊剂化学分析方法　EDTA 容量法测定氧化铝量
	JB/T 7948.5—1999	熔炼焊剂化学分析方法　黄基水杨酸光度法测定氧化铁量
	JB/T 7948.6—1999	熔炼焊剂化学分析方法　热解法测定氟化钙量
	JB/T 7948.7—1999	熔炼焊剂化学分析方法　氟氯化铅-EDTA 容量法测定氧化钙量
	JB/T 7948.8—1999	熔炼焊剂化学分析方法　钼蓝光度法测定磷量
	JB/T 7948.9—1999	熔炼焊剂化学分析方法　火焰光度法测定氧化钠、氧化镁量
	JB/T 7948.10—1999	熔炼焊剂化学分析方法　燃烧-库仑法测定碳量
	JB/T 7948.11—1999	熔炼焊剂化学分析方法　燃烧-碘量法测定硫量
	JB/T 7948.12—1999	熔炼焊剂化学分析方法　EDTA 容量法测定氧化钙、氧化镁量
	JB/T 8423—1996	电焊条焊接工艺性能评定方法
	JB/T 8931—1999	堆焊层超声探伤方法
工艺方法	JB/T 4251—1999	摩擦焊通用技术条件
	JB/T 6046—1992	碳钢，低合金钢焊接构件焊后热处理方法
	JB/T 6965—1993	焊接操作机
	JB/T 6967—1993	电渣焊通用技术条件
	JB/T 8833—1999	焊接用变位机
	JB/T 9185—1999	钨极惰性气体保护焊工艺方法
	JB/T 9186—1999	二氧化碳气体保护焊工艺规程
	JB/T 9187—1999	焊接用滚轮架
	JB/T 10375—2002	焊接构件振动时效工艺参数选择及技术要求
焊接安全	GB 3609.1—1994	焊接眼、面防护具
	GB 5748—1996	电焊烟尘的测定



续表 7.6-2

标准类别	标 准 编 号	标 准 名 称
焊接安全	GB 9448—1999	焊接与切割安全
	GB 15701—1995	焊接防护服
	GB 16194—1996	车间空气中电焊烟尘卫生标准
热切割	GB/T 5107—1985	焊接和切割用软管接头
	JB/T 5101—1991	切割机用割炬
	JB/T 5102—1999	坐标式气割机
	JB/T 6104—1992	摇臂式仿形气割机
	JB/T 6968—1993	便携式微型焊炬
	JB/T 6969—1993	射吸式焊炬
	JB/T 6970—1993	射吸式割炬
	JB/T 7436—1994	小车式气割机
	JB/T 7437—1994	干式回火保险器
	JB/T 7438—1994	空气等离子切割机
	JB/T 7947—1999	等压式焊炬割炬
	JB/T 7950—1999	快速割嘴
	JB/T 8795—1998	水电解氢氧发生器
	JB/T 10054.1—1999	热切割 方法和分类
	JB/T 10054.2—1999	热切割 术语和定义
	JB/T 10054.3—1999	热切割 气割质量和尺寸偏差
	JB/T 10054.4—1999	热切割 等离子弧切割质量和尺寸偏差

这种情况既体现了焊接工艺的特殊性，也反映出我国在材料、工艺、制造水平、传统习惯等方面与其他国家存在着一定的差异。

(2) ISO 的焊接标准体系

根据 ISO/TC44 的内部分工，其焊接标准体系按各下属机构的归口领域划分为如下几类：即焊接材料，弧焊设备，焊缝的试验、检验，电阻焊，术语及表示方法，气焊，焊接健康与安全，金属焊接领域内的统一要求，焊接人员认可，软钎焊及硬钎焊。

截止至 2003 年 4 月，ISO/TC44 归口的标准数量已达 188 项。进入 20 世纪 90 年代以来，ISO/TC44 每年的工作项目数量一直保持在数十项甚至上百项以上。这种状况表明：ISO 的焊接标准尚处于动态平衡状态。ISO/TC44 现有焊接标准体系见表 7.6-3。

表 7.6-3 ISO 焊接标准体系表

标准类别	标 准 编 号	标 准 名 称
焊接材料及相关试验	ISO 544：1989	手工焊填充材料 - 尺寸要求
	ISO 636：1989	氧乙炔、TIG 焊、堆焊用碳钢及低合金钢实芯焊丝 - 分类
	ISO 864：1988	电弧焊 - 碳锰钢实芯及管状焊丝、筒形焊丝盘，轮形焊丝卷的尺寸
	ISO 1071：1983	手工电弧焊铸铁焊条 - 代号
	ISO 2401：1972	涂料焊条 - 焊条效率，金属回收率及熔敷系数的测定
	ISO 2560：1973	低碳钢及低合金钢焊条 - 标志符号的规定
	ISO 3580：1975	抗蠕变钢焊条 - 标志符号的规定
	ISO 3581：1976	不锈钢及其他类似高合金钢焊条 - 标志符号的规定
	ISO 3690：1977	焊接 - 低碳钢及低合金钢焊条熔敷金属中氢的测定
	ISO 5179：1983	使用变间隙试件的可钎焊性研究
	ISO 6847：2000	手工电弧焊焊条 - 熔敷金属化学分析试样
	ISO 6848：1984	气体保护焊及等离子焊用钨极
	ISO 8249：2000	镍铬钢焊条奥氏体熔敷金属中铁素体的测定
	ISO 10446：1990	焊接 - 铬及铬镍不锈钢焊条的全焊缝金属试件



续表 7.6-3

标准类别	标 准 编 号	标 准 名 称
焊接材料及相关试验	ISO 14171：2002	焊接材料 – 非合金钢及细晶粒钢埋弧焊用焊丝及焊丝 – 焊剂组合 – 分类
	ISO 14175：1997	焊接材料 – 弧焊及切割用保护气体
	ISO 14343：2002	焊接材料 – 不锈钢及耐热钢弧焊焊丝、填充丝 – 分类
	ISO 14344：2002	焊接及相关工艺 – 埋弧焊及气体保护焊 – 焊接材料采购指南
	ISO 14732：2000	焊接材料 – 通过扩散氢测定确定焊条吸潮能力
	ISO 15792 – 1：2000	焊接材料 – 试验方法 – 第一部分：钢、镍及镍合金全焊缝金属试样试验方法
	ISO 15792 – 2：2000	焊接材料 – 试验方法 – 第二部分：钢材单道焊及双道焊缝焊缝试样的制备
	ISO 15792 – 3：2000	焊接材料 – 试验方法 – 第三部分：焊接材料角焊缝根部熔深及成形能力的分类试验
弧焊设备	ISO 700：1982	手工电弧焊及 TIG 焊用电源
破坏性试验及无损检验	ISO 1027：1983	无损检验用射线检验象质计 – 原理及识别
	ISO 1106 – 1：1984	50 mm 厚以下钢板熔化焊对接接头的射线检验
	ISO 1106 – 2：1985	50 ~ 200 mm 厚以下钢板熔化焊对接接头的射线检验
	ISO 1106 – 3：1984	壁厚 50 mm 以下钢管环形接头的射线检验
	ISO 2400：1972	钢焊缝 – 超声波检验设备校准用标准块
	ISO 2437：1972	5 ~ 50 mm 厚铝及铝合金，镁及镁合金熔化焊对接接头 X 射线检验的推荐方法
	ISO 2504：1973	焊缝射线检验及底片条件 – 象质计推荐型的使用
	ISO 4136：2001	金属材料焊缝的破坏性试验 – 横向拉伸试验
	ISO 5173：2000	金属材料焊缝的破坏性试验 – 弯曲试验
	ISO 5177：1981	钢熔化焊对接接头 – 横向侧弯试验
	ISO 5178：2001	金属材料焊缝的破坏性试验 – 熔焊接头焊缝金属的纵向拉伸试验
	ISO 7963：1985	钢焊缝 – 焊缝超声波检验用 2 号标块
	ISO 9015 – 1：2001	金属材料焊缝的破坏性试验 – 第一部分：弧焊接头的硬度试验
	ISO 9016：2001	金属材料焊缝的破坏性试验 – 冲击试验 – 试样部位、缺口方位及检验
	ISO 9017：2001	金属材料焊缝的破坏性试验 – 断裂试验
	ISO 14270：2000	电阻点焊、缝焊及凸焊接头的机械剥离试验的试样尺寸及程序
	ISO 14271：2000	电阻点焊、缝焊及凸焊接头的维氏硬度试验（低载荷及显微硬度）
	ISO 14272：2000	电阻点焊、缝焊及凸焊接头的横向拉伸试验的试样尺寸及程序
	ISO 14273：2000	电阻点焊、缝焊及凸焊接头的剪切试验的试样尺寸及程序
电阻焊	ISO 669：2000	电阻焊 – 机械和电要求
	ISO 693：1982	缝焊滚轮毛坯尺寸
	ISO 865：1981	凸焊机台板槽
	ISO 1089：1980	电阻焊设备的锥形电极配件—尺寸
	ISO 5182：1991	焊接 – 电阻焊电极及辅助设备用材料
	ISO 5183 – 1：1988	电阻点焊 – 电极连接器阳极锥度（1:10） – 第一部分；锥形装配锥度 1:10
	ISO 5183 – 2：1988	电阻点焊 – 电极连接器阳极锥度（1:10） – 第二部分；末端插入电极平行装配
	ISO 5184：1979	电阻点焊直电极
	ISO 5821：1979	电阻点焊电极帽
	ISO 5822：1988	点焊设备 – 锥度塞规和环形锥度规
	ISO 5826：1983	电阻焊机变压器 – 适用于所有变压器的通用技术条件
	ISO 5827：1983	点焊 – 电极座及电极夹
	ISO 5828：1983	电阻焊设备 – 端头与水冷接头连接的二次连接电缆 – 尺寸和特性
	ISO 5829：1984	电阻点焊 – 电极接头，内孔锥度 1:10



续表 7.6-3

标准类别	标准编号	标准名称
电阻焊	ISO 5830：1984	电阻点焊－阳电极帽
	ISO 6210－1：1991	机器人电阻焊枪用气缸－第一部分：一般要求
	ISO 7284：1984	电阻焊设备－适用于汽车工业的带有两个分离二次绕组多点焊变压器的特殊技术条件
	ISO 7285：1995	机械化多点焊用气动缸
	ISO 7286：1986	电阻焊设备图标符号
	ISO 7931：1985	电阻焊设备－绝缘帽及绝缘套
	ISO 8167：1989	电阻焊－多点凸焊
	ISO 8205－1：2002	电阻焊水冷二次线缆－第一部分：双重导体线缆的尺寸及要求
	ISO 8205－2：2002	电阻焊水冷二次线缆－第二部分：单导体线缆的尺寸及要求
	ISO 8205－3：1993	电阻焊水冷二次线缆－第三部分：试验要求
	ISO 8430－1：1988	电阻点焊－电极夹头－第一部分：装配锥度 1:10
	ISO 8430－2：1988	电阻点焊－电极夹头－第二部分：莫氏装配锥度
	ISO 8430－3：1988	电阻点焊－电极夹头－第三部分：末端插入电极平行装配
	ISO 9312：1990	电阻焊设备－电极支撑用的绝缘销
	ISO 9313：1989	电阻点焊设备－冷却管
	ISO 10656：1996	电阻焊－焊枪的集成变压器
	ISO 12145：1998	电阻焊设备－悬挂点焊电极的角度
	ISO 12166：1997	电阻焊设备－汽车工业多点焊用带有一个二次绕组变压器的特殊技术要求
	ISO 10447：1991	焊接—电阻点焊、凸焊及缝焊焊缝的剥离、凿铲试验
术语及表示方法	ISO 857－1：1998	焊接，硬钎焊和软钎焊方法－术语
	ISO 2553：1992	焊接，硬钎焊及软钎焊接头在图样上的表示方法
	ISO 4063：1998	金属的焊接、硬钎焊、软钎焊及钎接焊－用于图样上符号表示的工艺术语及参照代号
	ISO 6520－1：1998	焊接及相关工艺－金属材料的几何缺陷分类－第一部分：熔化焊
	ISO 6520－2：2001	焊接及相关工艺－金属材料的几何缺陷分类－第二部分：压力焊
	ISO 6947：1993	焊缝－工作位置－倾角和转角的定义
	ISO 9692：1992	手工电弧焊、气体保护焊及气焊－钢的接头制备
	ISO 9692－2：1998	焊接及相关工艺—接头制备—第二部分：钢的埋弧焊
	ISO 17658：2002	焊接－火焰切割、激光切割和等离子切割缺陷－术语
	ISO 17659：2002	焊接－附说明的多语种焊接接头术语
气焊	ISO 2503：1998	焊接－焊接、切割及相关工艺用气瓶调节器
	ISO 3253：1998	焊接、切割及相关工艺设备用软管接头
	ISO 3821：1998	焊接－焊接、切割及相关工艺用橡胶软管
	ISO 5171：1995	焊接、切割及相关工艺用压力表
	ISO 5172：1995	手工焊、割炬
	ISO 5175：1987	气焊、切割及相关工艺设备用燃气、氧气或压缩空气的安全装置－一般技术要求
	ISO 5186：1995	带圆柱形燃烧室的切割机用氧燃气割炬－一般技术条件及试验方法
	ISO 7287：2002	热切割设备图标符号
	ISO 7289：1996	焊接、切割及相关工艺用带有关闭阀的快速接头
	ISO 7291：1990	焊接、切割及相关工艺—汇流调压器
	ISO 7292：1997	焊接、切割及相关工艺用气瓶上的流量调节器－分类及技术条件
	ISO 8206：1991	氧切割机械验收试验－重复精度－工作特性
	ISO 8207：1996	气焊设备－焊接、切割及相关工艺设备上软管装置的技术条件



续表 7.6-3

标准类别	标 准 编 号	标 准 名 称
气焊	ISO 9012：1998	射吸式手工焊炬 – 技术要求
	ISO 9013：1992	焊接及相关工艺 – 氧燃气火焰切割表面质量等级和尺寸公差
	ISO 9090：1989	气焊及相关工艺设备的气密性
	ISO 9539：1988	气焊，切割及相关工艺设备用材料
	ISO 12170：1996	气焊设备 – 焊接及相关工艺用热塑软管
	ISO 14112：1996	气焊设备 – 气体钎焊及气焊用微型套件
	ISO 14113：1997	气焊设备 – 压缩气体或液化气体用、最高设计压力为 450 bar 的橡胶及热塑软管
	ISO 14114：1999	气焊设备 – 焊接、切割及相关工艺用乙炔汇流系统 – 一般要求
	ISO 15615：2002	气焊设备 – 焊接、切割及相关工艺用乙炔汇流系统 – 高压装置的安全要求
健康与安全	ISO 10882 – 1：2001	焊接及相关工艺的健康与安全 – 在操作人员呼吸区内气体及悬浮微粒的采集取样 – 第一部分：悬浮微粒的采集取样
	ISO 10882 – 2：2000	焊接及相关工艺的健康与安全 – 在操作人员呼吸区内气体及悬浮微粒的采集取样 – 第二部分：气体的采集取样
	ISO 15011 – 1：2002	焊接及相关工艺的健康与安全 – 第一部分：气体微粒的分析取样及发气率的测定
金属焊接领域的统一要求	ISO 581：1980	焊接性定义
	ISO 3834 – 1：1994	焊接质量要求 – 金属材料的熔化焊 – 第一部分：选择及使用指南
	ISO 3834 – 2：1994	焊接质量要求 – 金属材料的熔化焊 – 第二部分：完整的质量要求
	ISO 3834 – 3：1994	焊接质量要求 – 金属材料的熔化焊 – 第三部分：一般的质量要求
	ISO 3834 – 4：1994	焊接质量要求 – 金属材料的熔化焊 – 第四部分：基本的质量要求
	ISO 5817：1992	钢的弧焊接头 – 缺陷质量分等
	ISO 9956 – 1：1995	金属材料焊接工艺规程及认可 – 第一部分：熔化焊的一般原则
	ISO 9956 – 2：1995	金属材料焊接工艺规程及认可 – 第二部分：弧焊的焊接工艺规程
	ISO 9956 – 3：1995	金属材料焊接工艺规程及认可 – 第三部分：钢弧焊的焊接工艺试验
	ISO 9956 – 4：1995	金属材料焊接工艺规程及认可 – 第四部分：铝及铝合金弧焊的焊接工艺试验
	ISO 9956 – 5：1995	金属材料焊接工艺规程及认可 – 第五部分：利用认可焊接材料的认可
	ISO 9956 – 6：1995	金属材料焊接工艺规程及认可 – 第六部分：关于以前经验的认可
	ISO 9956 – 7：1995	金属材料焊接工艺规程及认可 – 第七部分：利用标准焊接规程的认可
	ISO 9956 – 8：1995	金属材料焊接工艺规程及认可 – 第八部分：利用生产试验的认可
	ISO 9956 – 10：1996	金属材料焊接工艺规程及认可 – 第十部分：电子束焊接工艺规程
	ISO 9956 – 11：1996	金属材料焊接工艺规程及认可 – 第十一部分：激光焊接工艺规程
	ISO 10042：1992	铝及铝合金的弧焊接头—缺陷质量分级指南
	ISO 13916：1996	焊接 – 预热温度、道间温度及预热维持温度的测定
	ISO 13918：1998	焊接 – 螺柱弧焊用螺柱及陶瓷套箍
	ISO 13919 – 1：1996	焊接 – 电子束及激光焊接头 – 缺陷分级指南 – 第一部分：钢
	ISO 13919 – 2：2001	焊接 – 电子束及激光焊接头 – 缺陷分级指南 – 第二部分：铝及铝合金
	ISO 13920：1996	焊接 – 焊接结构的一般公差 – 长度和角度尺寸 – 形状及位置
	ISO 14555：1998	焊接 – 金属材料的螺柱弧焊
	ISO 14744 – 1：2000	焊接 – 电子束焊机的验收检验 – 第一部分：原则及验收条件
	ISO 14744 – 2：2000	焊接 – 电子束焊机的验收检验 – 第二部分：加速电压特性的测定
	ISO 14744 – 3：2000	焊接 – 电子束焊机的验收检验 – 第三部分：电子束电流特性的测定
	ISO 14744 – 4：2000	焊接 – 电子束焊机的验收检验 – 第四部分：焊接速度的测定
	ISO 14744 – 5：2000	焊接 – 电子束焊机的验收检验 – 第五部分：Run – out 精度的测定



续表 7.6-3

标准类别	标 准 编 号	标 准 名 称
金属焊接领域的统一要求	ISO 14744－6：2000	焊接－电子束焊机的验收检验－第六部分：点焊位置稳定性的测定
	ISO 14554－1：2000	焊接质量要求－金属材料的电阻焊－第一部分：完整的质量要求
	ISO 14554－2：2000	焊接质量要求－金属材料的电阻焊－第二部分：基本的质量要求
	ISO/TR 15608：2000	焊接－金属材料分类体系指南
	ISO 15609：2001	金属材料焊接工艺规程及认可－焊接工艺规程－第二部分：气焊
	ISO 15614－8：2002	金属材料焊接工艺规程及认可－焊接工艺试验－第八部分：管及管－板接头的焊接
	ISO 15614－11：2002	金属材料焊接工艺规程及认可－焊接工艺试验－第十一部分：电子束及激光焊接
	ISO 15620：2000	焊接－金属材料的摩擦焊
	ISO/TR 17663：2001	焊接－与焊接及相关工艺有关的热处理质量要求指南
	ISO/TR 17671－1：2002	焊接－金属材料焊接推荐工艺－第一部分：弧焊的一般导则
	ISO/TR 17671－2：2002	焊接－金属材料焊接推荐工艺－第二部分：黑色金属的电弧焊
	ISO/TR 17671－3：2002	焊接－金属材料焊接推荐工艺－第三部分：不锈钢的电弧焊
	ISO/TR 17671－4：2002	焊接－金属材料焊接推荐工艺－第四部分：铝及铝合金的电弧焊
人员认可	ISO 9606－1：1994	焊工的认可试验－熔化焊－第一部分：钢
	ISO 9606－2：1994	焊工的认可试验－熔化焊－第二部分：铝及铝合金
	ISO 9606－3：1999	焊工的认可试验－熔化焊－第三部分：铜及铜合金
	ISO 9606－4：1999	焊工的认可试验－熔化焊－第四部分：镍及镍合金
	ISO 9606－5：2000	焊工的认可试验－熔化焊－第四部分：钛及钛合金、锆及锆合金
	ISO 14731：1997	焊接管理－任务及职责
	ISO 14732：1998	焊接人员－金属材料全机械化及自动化焊接，熔化焊及电阻焊设备操作者的认可试验
	ISO 15618－1：2001	水下焊焊工考试－第一部分：高气压湿法焊接的潜水焊工
	ISO 15618－2：2001	水下焊焊工考试－第二部分：高气压干法焊接的潜水焊工
钎焊	ISO 3677：1992	硬钎焊及软钎焊填充金属－符号规定
	ISO 5187：1995	焊接及相关工艺－钎焊接头力学性能试验方法
	ISO 9453：1990	软钎焊合金化学成分和组成
	ISO 9454－1：1990	软钎焊钎剂－分类及技术要求－第一部分：分类标记和包装
	ISO 9454－2：1998	软钎焊钎剂－分类及技术要求－第二部分：使用要求
	ISO 9455－1：1990	软钎焊钎剂试验方法－第一部分：不挥发物质的测定－重量分析法
	ISO 9455－2：1993	软钎焊钎剂试验方法－第二部分：不挥发物质的测定－沸点测定法
	ISO 9455－3：1992	软钎焊钎剂试验方法－第三部分：酸值的测定－电位滴定法和目视滴定法
	ISO 9455－5：1992	软钎焊钎剂试验方法－第五部分：铜镜试验
	ISO 9455－6：1995	软钎焊钎剂试验方法－第六部分：卤素（氟化物除外）含量的确定及检测
	ISO 9455－8：1991	软钎焊钎剂试验方法－第八部分：锌含量的测定
	ISO 9455－9：1993	软钎焊钎剂试验方法－第九部分：氨含量的测定
	ISO 9455－10：1998	软钎焊钎剂试验方法－第十部分：钎剂功效试验、软钎料铺展法
	ISO 9455－11：1991	软钎焊钎剂试验方法－第十一部分：钎剂残渣溶解性的评定
	ISO 9455－12：1992	软钎焊钎剂试验方法－第十二部分：钢管腐蚀试验
	ISO 9455－13：1996	软钎焊钎剂试验方法－第十三部分：钎剂飞溅的测定
	ISO 9455－14：1991	软钎焊钎剂试验方法－第十四部分：钎剂残渣干燥度的评定
	ISO 9455－15：1996	软钎焊钎剂试验方法－第十五部分：铜腐蚀试验
	ISO 9455－16：1998	软钎焊钎剂试验方法－第十六部分：钎剂功效试验、润湿平衡法
	ISO 9455－17：2002	软钎焊钎剂试验方法－第十七部分：钎剂残留物的表面绝缘电阻梳齿试验及电化学迁移试验





续表 7.6-3

标准类别	标 准 编 号	标 准 名 称
钎焊	ISO 10564：1993	软钎料及硬钎料－钎料分析试样的取样方法
	ISO 12224－1：1997	软钎焊用实芯及药芯焊丝—技术条件及试验方法—第一部分：分类及使用要求
	ISO 12224－2：1997	软钎焊用实芯及药芯焊丝—技术条件及试验方法—第二部分：钎剂含量的测定

从表 7.6-3 可以发现 ISO 焊接标准体系呈现如下特点。

1）体系内每个标准既相对独立，又相互补充，标准的配套性比较强。

2）体系的覆盖面已广泛涉及与焊接产品质量有关的各个环节。

3）ISO 焊接标准体系中，用于技能评定、能力评估的"技术/管理型标准"比重正在逐步加大。

4）体系中各部分标准的发展尚不均衡。

（3）EN 焊接标准体系

就焊接标准体系的结构而言，EN 与 ISO 基本相同。现有的许多 EN 焊接标准来源于相应的 ISO 标准。CEN 过去在等同转化 ISO 标准时，一般在 ISO 编号上加 20000，并冠以 EN，如：ISO 2553 被等同转化为 EN 22553。而现在欧洲标准在等同、等效采用 ISO 标准时，则是直接在 ISO 标准编号前冠上 EN 代号，如：EN ISOXXXXX。

EN 焊接标准体系的形成体现了如下特点：EN 标准起点高，发展快。CEN/TC121 成立于 1987 年，但其焊接标准项目已与 ISO 基本对应一致，而且大有后来居上之势；EN 标准对 ISO 同类标准的影响较深，有些 EN 标准项目经必要的程序，直接在 ISO 成员范围内审核通过后，作为 ISO 标准颁布。

（4）美国 AWS 标准体系

美国标准分国家标准、政府标准、协会标准和企业标准四级。美国的国家标准由美国国家标准学会（ANSI）审批颁布。ANSI 一般不起草国家标准，它只是对有关协会标准进行协调，将经过确认可在全国范围内实施的协会标准作为国家标准发布。政府标准是由联邦政府制订或采用的标准。在政府标准中，军用标准占有很大比例。协会标准则由各行业团体制订并颁布的标准。美国的行业组织繁多，这部分标准数量多，涉及面广，影响深远，构成了美国标准的重要组成部分。

就焊接领域而言，美国焊接学会（AWS）标准是美国焊接标准的主体部分。AWS 成立于 1919 年，现有成员 5 万多人。AWS 标准由其技术活动委员会下属的 31 个专业组织机构具体负责。目前在 AWS 标准中，70% 的 AWS 标准获得 ANSI 确认，以国家标准的形式颁布实施。

根据 AWS 的分类方法，目前 AWS 标准可分成术语符号、填充金属、计算机数据库中焊接信息的表述、检验、培训及资格认可、焊接工艺、结构及工业应用、健康与安全等八大类。

AWS 标准体系的特点表现在：体系中每个标准相对独立，标准的适用范围明确，针对性强；标准的内涵丰富，实用方便；与 ISO 标准相比，在焊接材料、工艺及结构应用等方面优势明显。

（5）日本 JIS 焊接标准体系

日本标准分国家标准、团体标准和企业标准。国家标准由两部分构成：即日本工业标准（JIS）和日本农林标准（JAS）。JIS 标准的制订、审议由通商产业省在工业标准化方面的职能机构——日本工业调査会负责。日本工业调査会按专业下设数十个分会，分会又由专门的技术委员会负责各个专业领域的标准化工作。

在 JIS 标准分类中，焊接标准分在 Z 类。但一些焊接设备、焊接用原材料及防护装置标准归属于 C 类、G 类、K 类、T 类。JIS 标准统一由日本标准协会出版发行。根据日本标准协会的分类方法，日本的焊接标准体系由术语符号、试验检查、焊接材料、气割、焊接施工、焊接技术鉴定、安全卫生和焊接设备等八部分组成。

日本焊接标准的体系结构相对比较稳定。体系中相当数量的标准参照美国标准制订，但依旧保持本国标准简明、扼要的风格特点。JIS 焊接标准中焊接材料、试验检验类标准数量多、覆盖面广，在国际上也享有盛誉。

3　材料焊接的通用准则

3.1　基础标准部分

（1）术语、符号及缺陷分类标准

在我国现有通用焊接标准体系之中，基础类标准包括术语、符号、表示方法、质量保证、工艺评定、人员考核、缺陷分类及质量分级标准。

GB/T 3375《焊接术语》标准包含了焊接通用术语 500 多条，涉及到熔焊、压焊、钎焊、焊接材料、热切割、工装辅助器具、缺陷及检验等领域。该标准对应的国外同类标准有：ISO857－1《焊接，硬钎焊和软钎焊方法－术语》和美国标准 ANSI/AWSA3.0《焊接术语》。

GB/T 5185 规定了各类焊接方法的表示代号，与之对应的国际标准是 ISO4063。

GB/T 324 制定于 1964 年，系我国的第一项焊接标准。该标准在 1980 年和 1988 年进行了两次修订，构成了现行版本。该标准针对焊缝符号——这一焊接领域内通用性技术语言，规定了具体的表述规则。

在国际上，ISO/TC44 颁布了 ISO2553《焊接、硬钎焊及软钎焊接头－在图样上的符号表示法》。而在欧洲，ISO2553 又被等同转化为 EN22553 颁布实施。美国和日本则制定了各自的国家标准，其标准编号分别为：ANSI/AWSA2.4 和 JISZ3021。

GB/T 985 和 GB/T 986 对焊接坡口的形式和尺寸做了规定，二者之间的主要差异在于针对不同的焊接方法。就技术内容而言，我国现行的 GB/T 985 和 GB/T 986 标准与 ISO 同类标准（ISO 9692 和 ISO 9692－2）并无实质性差别。由于标准体系方面的差异，美、日等国并没有制定焊接坡口形式及尺寸方面的专门标准。在美国和日本，这些内容往往融合在相应的产品标准或工艺标准中。虽然给出的方式或方法不同，但几乎所有的国内外标准在规定焊接坡口形式和尺寸时都立足于一个基本点。具体而言，标准所给出的坡口形式和尺寸都经过了大量的实践验证，在确保获得良好接头质量的同时兼顾焊接制造的经济性、合理性。

此外，这些标准的共同点还体现为：为了适用更多的产品及结构，标准给出的是基本的坡口形式；坡口尺寸则给出了一定的范围，而不是以公差的形式提出；标准规定的坡口条件一般是针对接头完全熔透的焊缝。

焊接缺陷分类、质量分级、外形尺寸、结构公差标准也是基础类标准的重要组成部分，表 7.6-4 列出了我国现行的标准和可供参考的 ISO 标准。

表 7.6-4　焊接缺陷及质量分级标准

标准所涉及的领域		我国标准	ISO 标准
		钢（金属材料）	钢（铝及铝合金）
缺陷分类	熔化焊	（GB/T 6417）	ISO 6520－1
	压力焊	（JB/T 6043）	ISO 6520－2
缺陷质量分级	弧焊	GB/T 19418	ISO 5817；（ISO 10042）
	激光电子束焊	—	ISO 13919－1
焊缝外形尺寸		JB/T 7949	—
焊接结构公差		GB/T XXXXX①	ISO 13920

① 为正在制订的标准项目。

我国现有的两项缺陷分类标准分别为 GB/T 6417 和 JB/T 7949。前者针对金属材料的熔化焊焊缝缺陷，后者针对的则是金属材料电阻焊接头中的焊接缺陷。GB/T 6417 制定于 1986 年，与当时的国际标准 ISO 6520 等效，而 JB/T 7949 是在等效西德标准 DIN8524－T2 的基础上制定。

从焊接工艺应用的普遍性而言，熔化焊的缺陷分类无疑更为人们所关注。ISO 早在 1982 年就制定了这方面的标准（ISO6520：1982）。进入 20 世纪 90 年代以来，ISO/TC44 又将原标准做了大幅度修改，按不同焊接工艺对缺陷进行分类规定。目前的 ISO6520 由系列标准构成。第一部分（ISO6520－1：1998）针对熔化焊焊缝缺陷分类，而第二部分（ISO6520－2：2001）针对压力焊缺陷。

ISO5817 规定了熔焊缺陷的质量分级指南。作为基础标准，该标准在焊工考试、工艺评定过程中得到普遍引用。在我国系统采用国际标准的背景形势下，ISO 5817 的等同转化工作已经完成。

（2）焊接质量要求标准

20 世纪 90 年代以来，随着 ISO 9000 系列标准在全球范围内得到普遍认可，ISO/TC44 和 CEN/TC121 同步开展了焊接质量要求系列标准的制、修订工作，并于 1994 年颁发了 ISO 3834.1－4 和 EN729.1－4 系列标准。而且 ISO 3834 与 EN729 在内容上是等同的。

我国于 1998 年将 ISO3834 等同转化为 GB/T 12467—1998 系列标准，并取代了 GB/T 12467—1990 和 GB/T 12468—1990 标准。

现行的 GB/T 12467 系列标准包括四部分：

GB/T 12467.1—1998《焊接质量要求　金属材料的熔化焊　第 1 部分：选择及使用指南》

GB/T 12467.2—1998《焊接质量要求　金属材料的熔化焊　第 2 部分：完整质量要求》

GB/T 12467.3—1998《焊接质量要求　金属材料的熔化焊　第 3 部分：一般质量要求》

GB/T 12467.4—1998《焊接质量要求　金属材料的熔化焊　第 4 部分：基本质量要求》

这套标准迎合了不同层次上的需要，从标准化的角度出发，对焊接质量保证的各方面质量要素提出了要求。这些要求即与 GB/T 19000 系列标准有一定的对应关系，又结合焊接的实际特点加以具体化。

作为成套的管理标准，其适用范围可从三方面界定：标准的应用主体可以是以焊接为一种加工工艺的制造企业或与之有关联的各方（如：用户、第三方认证机构或管理机构）；标准针对的产品是各类熔化焊金属结构；涉及的内容包括那些对产品质量有影响、又与焊接相关的质量因素。

GB/T 12467.1—1998《焊接质量要求　金属材料的熔化焊　第 1 部分：选择及使用指南》对后三部分的使用提出了指导性建议。它明确了质量体系中焊接部分要求的确定原则。当制造企业的质量体系符合 GB/T 19001 或 GB/T 19002 标准要求时，体系中焊接部分的质量要素应按 GB/T 12467.2 考虑，但可以根据焊接产品的实际条件做适当的删减。在质量体系不符合 GB/T 19001 或 GB/T 19002 的条件下，可从 GB/T 12467.1、GB/T 12467.2 和 GB/T 12467.3 三者中选择，以便确定合理的要求。

GB/T 12467.3 对焊接生产提出了比较全面的计划要求。与 GB/T 12467.2 相比，两者涉及的质量要素基本相同，只是在个别环节 GB/T 12467.2 的要求更为全面。因此，二者并不存在根本性差异，只是要求的严格程度不同而已。它们都要求焊接所涉及到的那些质量因素得到有效控制。如：焊接必须按书面的焊接规程进行；制造企业必须配备合适的人员；制造企业有能力处理较为复杂的焊接问题，诸如焊接性较差材料的焊接，预热、焊后热处理措施的采用等。

GB/T 12467.4 给出了一个不太复杂的焊接质量控制体系。它适用于对焊接工艺的实施不需做严格控制的时候。在焊接对产品的质量影响不大或者是焊接要求较低、只需选择合适的材料、由合格的焊工操作即可保证质量的场合，GB/T 12467.4 是最为合适的。

上述三部分标准主要内容的对比参见表 7.6-5。

表 7.6-5　三种焊接质量要求的总体对比

要　素	GB/T 12467.2 完整质量要求	GB/T 12467.3 一般质量要求	GB/T 12467.4 基本质量要求
合同评审	所有文件的评审	评审范围稍小	建立并具备咨询能力
设计评审	确认焊接的设计		
分承包商	按主要制造商对待		应符合所有要求
焊工	按相应标准认可（GB/T 15169）		
焊接管理	按 GB/T 19419 要求		无要求
检验人员	对检验人员的数量及能力有要求		要求较低，必要时可从他方获得



续表 7.6-5

要　　素	GB/T 12467.2 完整质量要求	GB/T 12467.3 一般质量要求	GB/T 12467.4 基本质量要求
生产设备	有要求		无特殊要求
设备维修	要求书面的维修计划	无特殊要求	无要求
生产计划	全面、详细	有限度的计划	无要求
焊接工艺规程	向焊工提供作业指导书		无要求
焊接工艺认可	按标准或合同进行认可（JB/T 6963）		无特殊要求
作业指导书	具有焊接工艺规程或明确的作业指令		无要求
文件	必需的	未规定	无要求
焊接材料的批量试验	合同有要求时进行	未规定	无要求
焊接材料的管理	按 JB/T 3223 标准要求		
母材的存放	避免环境影响；保持标志		无要求
焊后热处理	需要规程及完成记录	需对规程做确认	无要求
焊接适时检验	按规定的操作要求		按合同规定的职责
不符合项	具有一定措施		
校准	具有一定措施	未规定	
标志与可追溯性	一般有要求	必要时有要求	未规定
质量记录	需要	按合同要求	
	保存 5 年以上的时间		

（3）焊接工艺评定标准

国内外现行的焊接工艺评定标准数量很多，但针对一般结构产品的通用性焊接工艺评定标准主要有：ISO 9956.3、ANSI/AWSD1.1、JIS Z 3040 等。

ISO/TC44/SC10 从 20 世纪 90 年代开始致力于焊接工艺规程及认可方面的标准制订工作。1995 年与 EN288 等效的 ISO9956 系列标准开始陆续问世。在 ISO 9956 系列标准中，ISO 9956.3 描述了如何利用焊接工艺试验对焊接工艺进行认可的方法。1998 年，ISO 又对这部分做了补充修改，并颁发了 ISO 9956.3/AMD1（修正案）。ISO 9956.5 - ISO9956.8 则对采用其他方法进行工艺认可提出了要求。

美国的 ANSI/AWSD1.1 是一部内容丰富的钢结构焊接规范。焊接工艺评定及焊工认可部分占了专门的章节。包括焊接工艺评定及焊工认可在内的大部分章节适用于各类钢结构，个别章节则针对着不同的承载结构和管结构。

日本 JISZ3040 标准制订于 1981 年，当时主要借鉴了 ASME《锅炉压力容器规范》第 IX 卷，适用的产品对象也是锅炉、压力容器。在 1995 年修订后，JISZ3040 做了较大的改变，删除了针对锅炉压力容器产品的特殊部分，并对各类母材和焊接材料（包括：焊条、焊丝、焊剂）做了全面的分类归纳，使之适用范围扩大至各类焊接结构产品。

我国焊接焊接工艺评定标准长期以来处于一种不尽完善的状态，主要表现在尚未制定统一、通用的焊接工艺评定国家标准。从发展角度而言，适时跟踪 ISO 9956 系列标准的变化，及时将其等同转化是我国焊接工艺评定标准今后的发展方向。

现有国内外焊接工艺评定标准主要内容的对比见表 7.6-6。

（4）焊接人员要求标准

焊接人员认可是焊接质量保证的重要环节之一。在 ISO 9000 系列标准中，焊接被视为一种“特殊工艺”。由于这种“特殊工艺”的加工结果无法通过随后的检验得到完整、充分的验证，因此对它的实施需要做周密的策划、准备、安排和监控。而对作业人员操作技能的考核和认可则是其中的主要内容。

焊接人员技能评定的核心内涵就是通过一系列专门设计的程序、试验，对焊接人员在限定条件下焊制出符合规定要求焊缝的能力进行确认。为了保证这种“确认”过程规范、简便且有针对性，各种类型的焊接人员认可标准就产生了。

表 7.6-6　国内外标准主要内容的对比

标准编号	ISO 9956.3	ANSI/AWSD1.1	JIS Z 3040	JB/T 6963
评定出发点	追求评定方法的科学性、合理性，通过少量试验，获得尽可能大的认可范围			
适用范围	钢	钢结构	焊接结构	钢制件
涉及的工艺	弧焊（具体包括：手工电弧焊、自保护和气保护药芯焊丝电弧焊、埋弧焊、TIG 焊、MIG 焊、MAG 焊、等离子弧焊）	手工电弧焊、药芯焊丝电弧焊、埋弧焊、气体保护焊、电渣焊、气电立焊	手工电弧焊、自保护电弧焊、埋弧焊、TIG 焊、MIG 焊、MAG 焊、电子束焊、等离子弧焊、电渣焊、气电立焊	熔化焊

续表 7.6-6

标准编号		ISO 9956.3	ANSI/AWSD1.1	JIS Z 3040	JB/T 6963
接头及焊缝	板材对接焊缝	√	√	√	√
	管材对接焊缝	√	√	√	√
	T形接头角焊缝	√	√	√	√
	套管接头角焊缝	√	√	√	√
	管板对接角焊缝		√		
	插管角焊缝			√	
评定规则特点		采用限定评定合格适用范围的方法，超出标准规定范围时需重新评定	采用主要参数评定体系、针对每种工艺规定主要参数的允许范围，参数变化超出次范围时需做重新评定	材料类组划分细致，并在此基础上对各类工艺方法影响接头性能的共性因素提出要求	综合吸纳日、美标准的评定规则，在做共性因素限定的同时，提出特定因素要求

综观国内外的焊接人员认可标准，基本上可以划分为两大类：即通用性和专用性考核标准。专用性标准一般以特定的产品为对象，焊接人员的考核认可往往结合产品的特定条件进行，如各国的船级社焊工考核标准、锅炉、压力容器产品规程中的焊工考核要求等；而通用性考核标准一般不受产品种类限制。这类标准以不同产品或结构的共性条件为基础，提出最基本的考核要求，如 ISO 9606 系列标准。

根据焊接工艺自动化程度的不同，可划分为焊工考核和焊接操作工考核两部分。前者涉及到从事手工焊、半自动焊焊接的焊工；后者则针对自动焊、机械化焊接的焊接操作工。鉴于我国目前手工焊在焊接工艺比例中占有绝对的数量优势，我国手工焊的焊工考试标准起步较早，而焊接操作工的考试标准则准备等效相应的国际标准 ISO 14732。

修订后的 GB/T 15169 标准等效采用了最新的国际标准草案 ISO/DIS 9606-1，该标准规定了手工焊的焊工技能评定规则，内容包括范围、规范性引用文件、术语、符号及缩略语、主要参数及认可范围、试验及检验、试件验收要求、补考、有效期、证书及焊工合格证书等 11 部分。此外，标准的附录还对证书格式、标记示例、专业知识、延期应考虑的要素、钢材分类及断裂试验方法做了说明。

从焊接质量保证的总体要求而言，从事与焊接相关活动的管理人员是关键的要素。为此，我国在等效采用 ISO 14731（EN 719）的基础上，制定了国家标准 GB/T 19419，并对相应的任务和职责提出了具体要求。表 7.6-7 包含了这些要求的具体内涵。

表 7.6-7　焊接管理的任务职责要素

序号	焊接环节及要素
1	合同评审 制造组织的焊接能力、资质及有关活动
2	设计评审 1）有关焊接标准 2）设计要求的接头部位 3）焊接、检验及试验的可行性 4）焊接接头的详细要求 5）焊缝的质量及合格要求
3	材料
	（1）母材 1）母材的焊接性 2）材料采购规程中包括材料证书种类在内的所有附加要求 3）母材的标识、贮存及保管 4）可追溯性

续表 7.6-7

序号	焊接环节及要素
3	（2）焊接材料 1）匹配性及选用合理性 2）供货条件 3）材料采购规程中包括焊接材料证书种类在内的所有附加要求 4）焊接材料的标识、贮存及保管
4	分承包 所有分承包商的能力及资质
5	生产计划 1）焊接工艺规程（WPS）及焊接工艺评定报告（WPAR 或 WPQR）的适用性 2）工作指令 3）焊接夹具及固定装置 4）焊工认可的适用性及有效性 5）结构的焊接及组装顺序 6）产品焊接试验要求 7）焊接检验要求 8）环境条件 9）健康与安全
6	设备 1）焊接及相关设备的适用性 2）设备及附件的供应、标识及保管 3）健康与安全
7	焊接操作
	（1）准备工作 1）颁发工作指令 2）接头制备、组装及清理 3）产品焊接试验准备 4）工作区域（包括环境在内）的适用性
	（2）焊接 1）焊工的分派、指示 2）设备及附件的使用或功能 3）焊接材料及辅助材料 4）定位焊接 5）焊接工艺参数 6）所有的中间试验 7）预热及焊后热处理方法 8）焊接顺序 9）焊工标识 10）焊后处理



续表 7.6-7

序号	焊接环节及要素
8	试验
	（1）外观检验 1）焊接的完整性 2）焊缝尺寸 3）焊接结构的形状、尺寸及公差 4）接头的外形
	（2）破坏性试验及无损检验 1）破坏性试验及无损检验的应用 2）特殊试验
9	焊接接头的验收 1）试验及检验结果的评定 2）焊缝返修 3）修复焊缝的重新评定 4）改进措施
10	文件 必要记录的准备及管理 （包括分承包活动在内）

3.2 焊接材料标准

我国现行的熔化焊焊接材料标准如表 7.6-8 所示。

其中，焊条标准占据着主导地位，现有的 9 项焊条标准涵盖了碳钢、低合金钢、不锈钢、铸铁及各类有色金属及其合金焊条。GB/T 5117、GB/T 5118 和 GB/T 983 是我国焊接行业应用广泛的三项焊条标准。这些焊条标准的基本内容包括：焊条的型号分类、技术要求、试验方法、检验规则、包装、标记和质量证明书等。

我国现有气体保护焊焊丝标准 7 项，内容涉及碳钢、低合金钢、不锈钢和有色金属的实芯焊丝和药芯焊丝。GB/T 8110 是应用最为普及的实芯焊丝标准，内容包括碳钢、低合金钢气体保护焊焊丝的型号分类、技术要求、试验方法、检验规则、焊丝的缠绕、包装、标记和质量证明书等。

随着我国药芯焊丝制造及应用技术的不断提高，相应的标准化工作也得到了长足发展。我国目前已经完成了碳钢、低合金钢和不锈钢药芯焊丝标准的制、修订。GB/T 10045、GB/T 17493 和 GB/T 17853 分别规定了碳钢、低合金钢和不锈钢药芯焊丝的技术要求。

埋弧焊用焊接材料方面，我国在“九五”期间根据市场的实际需求，改变了原有的格局，将焊丝和焊剂归纳在同一个标准中，形成了针对碳钢、低合金钢和不锈钢埋弧焊专用的焊接材料标准。其中，GB/T 5293 提出了碳钢埋弧焊焊丝和焊剂的要求；GB/T 12460 提出了低合金钢埋弧焊焊丝和焊剂的要求；GB/T 17854 则给出了不锈钢埋弧焊焊丝和焊剂的要求。

表 7.6-8 我国焊接材料标准现状

材料＼焊接方法	手工电弧焊	气体保护焊	埋弧焊
碳钢	GB/T 5117—1995 JB/T 6964—1993	GB/T 8110—1995（实芯） GB/T 10045—2001（药芯）	GB/T 5293—1999
低合金钢	GB/T 5118—1995	GB/T 8110—1995（实芯） GB/T 17493—1998（药芯）	GB/T 12460—2003
不锈钢	GB/T 983—1995	GB/T 17853—1999（药芯）	GB/T 17854—1999
铸铁	GB/T 10044—1988*		
铝及铝合金	GB/T 3669—2001	GB/T 10858—1989	—
铜及铜合金	GB/T 3670—1995	GB/T 9460—1988	—
镍及镍合金	GB/T 13814—1992	GB/T 15620—1995	—
其他	GB/T 984—2001 （堆焊用）	JB/T 3168.1—1999（合金粉末）	

注：焊丝仅适用于气焊。

就这些焊接材料标准的技术内容而言，我国焊接材料标准基本上等效或参照采用了相应的美国标准和日本标准。其历史原因在于：一方面是出于我国焊接材料国际贸易的需要；另一方面则是由于长期以来 ISO 焊接材料标准由于存在技术争议而处于停滞不前的状态。

20 世纪 90 年代以来，国际焊接界为改进 ISO 焊接材料标准做了不懈的努力。特别是 ISO 2560 标准的成功修订，通过将不同技术体系并存同一 ISO 标准的方式，在协调国际上技术争议方面取得了突破性的进展。其他的 ISO 焊条、焊丝和焊剂标准也正按照这一模式开展工作。

随着 ISO 焊接材料标准的不断完善和改进，特别是我国焊接材料标准的采用对象（美国标准和日本标准）也在不断向国际标准靠拢、渗透，与新的 ISO 焊接材料标准体系接轨将成为我国焊接材料标准今后发展的主要趋势。

3.3 焊接试验及检验标准

在我国的现行焊接标准体系中，焊接试验、检验标准数量繁多，占据着相当重要的地位。其中，针对焊接接头的各类试验（具体包括破坏性试验和无损检测两大类）方法标准是其核心部分。

（1）焊接破坏性试验方法标准

根据材料焊接性的具体内涵，焊接接头的破坏性试验可划分为工艺焊接性试验和使用焊接性试验。工艺焊接性试验方法标准包括：

GB/T 4675.1—1984 焊接性试验 斜 Y 形坡口焊接裂纹试验方法；



GB/T 4675.2—1984 焊接性试验　搭接接头（CTS）焊接裂纹试验方法；

GB/T 4675.3—1984 焊接性试验　T形接头焊接裂纹试验方法；

GB/T 4675.4—1984 焊接性试验　压板对接（FISCO）焊接裂纹试验方法；

GB/T 4675.5—1984 焊接性试验　焊接热影响区最高硬度试验方法；

GB/T 7032—1986　T形角焊接头弯曲试验方法；

GB/T 9446—1988　焊接用插销冷裂纹试验方法；

GB/T 13817—1992　对接接头刚性拘束裂纹试验。

工艺焊接性的评定准则是考核接头产生工艺缺陷的倾向，为制定合理的焊接工艺提供依据。因此，裂纹试验是其主要内容。上述标准规定了各类焊接裂纹试验的细节要求，包括：试验材料、试件制备、试验条件、程序步骤、裂纹的检验和评估方法等。

使用焊接性是指焊接接头或整体结构满足各种使用性能的程度。因此，常规的力学性能试验就成为使用焊接性评估的基本内容。这些标准包括：

GB/T 2649—1989　焊接接头机械性能试验取样方法；

GB/T 2650—1989　焊接接头冲击试验方法；

GB/T 2651—1989　焊接接头拉伸试验方法；

GB/T 2652—1989　焊缝及熔敷金属拉伸试验方法；

GB/T 2653—1989　焊接接头弯曲及压扁试验方法；

GB/T 2654—1989　焊接接头及堆焊金属硬度试验方法；

GB/T 13450—1992　对接接头宽板拉伸试验方法；

GB/T 15747—1995　正面角焊缝接头拉伸试验方法；

GB/T 16957—1997　复合钢板焊接接头力学性能试验方法。

GB/T 2649 规定了一般力学性能试验的试件制备和取样要求。而焊接接头的拉伸、冲击、弯曲和压扁、硬度试验则分别由 GB/T 2651、GB/T 2650、GB/T 2653 和 GB/T 2654 规定。GB/T 2652 提出了焊缝及熔敷金属的拉伸试验要求。

GB/T 13450 规定了金属材料对接接头宽板拉伸的试验方法，内容涉及：试样的形状和尺寸、制造要求、试验设备、试验条件及结果处理等。

GB/T 15747 规定了正面角焊缝接头拉伸试验方法，内容涉及：试件及试样的尺寸、试验程序、试验结果处理、试验报告等。

GB/T 16957 则针对复合钢板的特殊性提出了相应的焊接接头力学性能试验要求。

（2）焊接无损检测标准

在实际生产中，检验焊接接头质量的有效方法就是无损检测。无损检测方法一般包括：射线探伤、超声波检测、磁粉检验、渗透检验和涡流探伤等。

GB/T 3323 标准规定了射线探伤的基本方法，适用于金属材料板和管的熔化焊焊接接头。该标准在技术上与欧洲标准 EN1435 等效，与目前正在制定的国际标准草案也基本一致。具体内容包括：射线透照技术分级、射线探伤的通用规则和详细的透照方法等。与原标准（GB/T 3323—1987）相比，新标准在技术内容方面主要有如下变化。

1）更侧重射线照相的透照技术，而将焊接接头质量分级的有关规定放在了附录 C 中。

2）透照技术更注重其合理性和可操作性。

3）在保证缺陷检出率的同时，更注重其经济性。

GB/T 11345 标准规定了手工超声波探伤方法和结果分级。该标准在规定检验人员和检验设备要求的同时，更注重考虑了试块、检验等级、具体探伤方法、缺陷等级分类和结果评定等方面的技术内容。为了便于应用，该标准还在附录中提供了标准试块及对比试块的形状和尺寸、串列扫查探伤方法、DAC 曲线的绘制及声能传输损耗差的测定等。

JB/T 6061 和 JB/T 6062 标准分别规定了焊缝磁粉和渗透检验方法和缺陷的分级。这两项标准的共同点在于均是用于检验焊缝表面缺陷和近表面缺陷。不同点则是磁粉检验仅限于铁磁性材料，而渗透检验适用于非磁性材料。JB/T 6061 标准提出了磁粉检验的详细方法及要求，并规定了缺陷磁痕等级。JB/T 6062 标准内容涉及：检验人员、探伤液、检验操作、缺陷迹痕的分类、质量评定、检验结果的记录与检验报告等。此外为了便于使用，该标准还在附录中推荐了氟化物含量的测定方法。

编写：朴东光（哈尔滨焊接研究所）



参考文献

1 中国机械工程学会焊接学会编．焊接手册．第2版．北京：机械工业出版社，2001

2 周浩森等．焊接结构生产及装备．北京：机械工业出版社，1992

3 路文涛．焊接胎夹具设计．焊接技术，1994，(1)：40～41

4 李新等．现代汽车车身制造新技术．见：中国机械工程学会及其焊接分会编．汽车焊接国际论坛论文集．北京：机械工业出版社，2003，15～30

5 王政．焊接工装夹具及变位机械-性能、设计、选用．北京：机械工业出版社，2001

6 胡仕新．美国汽车车体装配与焊接研究现状．中国机械工程，1997，8（1)：24～26

7 北京有色金属设计研究总院．机械设计手册：第2卷．第3版．北京：化学工业出版社，2000

8 陈熙．车身质量控制．上海汽车．2000，(2)：31～37

9 梁乃刚．统计工序控制．北京：北京理工大学出版社，1993

10 张公绪．两种质量诊断理论及其应用．北京：科学出版社，2001

11 吴际，金茂忠．UML面向对象分析．北京：北京航空航天大学出版社，2002

12 孙静、张公绪．常规控制图及其应用．北京：中国标准出版社

13 高麟．Windows下的焊工技术档案管理系统．清华大学毕业论文，1995.6

14 洪钢．生命周期分析法－环境评估的有效工具．能源工程，1993，(3)

15 彭海昀等．清洁生产模糊数学评价方法．山东环境，1999，92（4)

16 吴越佳．清洁生产与ISO 14000，标准与质量综述，1999，(9)：15

17 贾安东等．焊接结构与生产．北京：机械工业出版社，1993

18 陈丙森．计算机辅助焊接技术．北京：机械工业出版社，1999

19 编辑部．Construction of arc welding data base．熔接技术．2002，(6)：111～114

20 野本敏治等．expectation for virtual engineering in innovative production technology．溶接技术．2001，(3)：62～67

21 松山钦一．Joining technology in the era of IT．熔接技术 2001，(6)：58～82

22 浅井知．IT welding factroy．熔接技术 2002，(5)：66～79

23 张全寿，周建峰．专家系统建造原理及方法．北京：中国铁道出版社，1992

24 Patterson D. W. Introduction to Artificial Intelligence and Expert Systems．Prentice－Hall Inc.，1990

25 盛丰等．人工智能原理与应用－专家系统、机器学习、面向对象的方法．北京：北京理工大学出版社，1993

26 Barborak D. M. Dickinson D. W. and Madigan R. B. PC－based expert systems and their applications to welding. Welding Journal，1991，70（1)：29～38

27 北京有色金属设计研究总院．机械设计手册：第4卷．第3版．北京：化学工业出版社，2000

28 程世玉等．焊接机器人系统在汽车底盘焊接中的应用．中国机械工程学会及其焊接分会编．汽车焊接国际论坛论文集．北京：机械工业出版社，2003，123～132

29 王政，刘萍．焊接工装夹具及其变位机械图册．北京：机械工业出版社，1992

30 许瑞麟．中国焊接装备发展展望．见：中国机械工程学会及其焊接分会编．汽车焊接国际论坛论文集．北京：机械工业出版社，2003，120～122

31 Wang Zheng，et al. Test and analysis of mechanism and influential elements of axial drifting of weldment on turning rolls. China welding，2003，12，(1)：50～53

32 机械工业部．机械产品目录．北京：机械工业出版社，1996

33 Kutsuna M. Survey on expert system and AI in welding technology from JICST.（1994年国际焊接年会交流资料）

34 何德文，柴立元．清洁生产思维下的环境影响评价程序，工业安全与环保，2002，(11)：34～36

35 刘超等．中国钢铁工业和清洁生产，中国工程科学，2001（9)：77～80

36 钱易．清洁生产与可持续发展，节能与环保，2002，(7)：10～13

37 余德辉，魏晓林．我国清洁生产现状和发展思路，中国环保产业，2001，(6)：16～19

38 Feitee，SE，etc，The new generation of gas－shielded metal－and slag powder filler wires with extremely low fume development，Schweiss & Pruftenchnik（Austria)，1998，52（2)；18～22

39 肖明，张群．我国钢铁工业清洁生产总体水平的评估，北京科技大学学报，2000，(3)：193～197

40 S E. Ferrree，New generration of cored wires creates less fume and spatter，Welding Journal，Dec. 1995 45－49

41 夏志东等．绿色高性能无铅钎料的研究与发展，电子工艺技术，2002，5（9)

42 Yavdoshchin. I. R，etc，Sources and possible ways of lowering fume generation in welding low alloy steels. IIW Reference (s) VIII－1500－89，IIW－1040－89－Z，1989，5（USSR Academy of Sciences USSR National Welding Committee)

43 Brown K L，Environmental aspects of fume in air and water. IIW reference（S)，VIII－1804－97，1997，6，lincoln

44 洪亮．绿色焊接．电子技术．2002，31（4)

45 马鑫等．无铅钎料发展现状．电子工艺技术．2002，23（3)

46 Van Nifterik.G. Information on environmental performance of distribution materials，Fuel and Energy，1996，37（3)．223

47 Lucas W. Experiences in developing expert systems and neural networks for welding. Proceedings of the 94' International Conference of International Institute of Welding，237～245．1994，Beijing，China



48 Ochodek Vl. Special software for selecting filler material. Proceedings of the 94' International Conference of International Institute of Welding, 378～379. 1994, Beijing, Chian

49 Lucas W. Welding engineering expert system and multimedia computer programs. Welding & Metal Fabrication, 1995, 63 (4): 141～148

50 Aroonwilas. A. and Bhole. S. D. Expert system for predicting continuous cooling transformation in steels. Computers and industrial Engineering, 1995, 20 (1～4): 165～169

51 中国焊接学会与中国焊接协会．第二届计算机在焊接中应用的学术与技术交流会论文集．1996.10，太原

52 中国焊接学会与中国焊接协会．第三届计算机在焊接中应用的学术与技术交流会论文集．2000.10，上海

53 H. B. Marri, A. Gunasekaran and R. J. Grieve. Computer－Aided Process Planning: A State of Art. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1998, (14): 261～268

54 Dimitris Kiritsis. A Review of Knowledge－Based Expert Systems for Process Planning. Methods and Problems. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1995, (10): 240～262

55 白万民．何博雄．周志友．CAPP系统中零件信息的输入方法．机械设计与制造，1992，No.4

56 董家骧．计算机辅助工艺过程设计系统智能开发工具．国防工业出版社，1996

57 王先逵，段广洪，毛周杰．Fuzzy Method in CAPP．清华大学学报，1996，(10)：67～72

58 王春山．专家系统在CAPP中的应用．机械设计与制造，1992，(6)

59 迟青枫，郭庆，宋敏．CAD/CAPP/MRPII/GT信息集成的探讨．计算机辅助设计与制造，1999，(10)

60 方毅．SGD2000CAPP——集成化工艺设计与工艺管理系统．计算机辅助设计与制造，2000，5

61 周玉清．MRPII原理与实施．天津大学出版社，1994

62 李龙梅．PDM技术应用分析．计算机辅助设计与制造，1997，(10)：P27～30

63 张振明，黄乃康，桓永兴等．面向产品的CAPP方法论及其智能化概念体系．中国机械工程，2007，(7)：760～762

64 陈冰泉，赵义奎．焊接数据库的研究与发展．湖北工学院学报，2002，17 (2)：172～174

65 魏艳红，高增福，杨松．焊接工艺规程数据库系统．焊接，1998，(3)：12～15

66 张骁勇，王宇，徐东．钢制压力容器焊接工艺评定数据库系统．西安石油大学学报，2004，19 (1)：70～72

67 赵义奎，陈冰泉．基于网络的焊接工艺评定管理数据库系统．武汉理工大学学报，2001，25 (4)：515～517

68 华学明，黄海，李佳慧．焊接工艺数据库及焊接工艺评定系统．上海工程技术大学学报，2001，15 (2)：113～117

69 吴志生，王成文，杨新华．焊接工艺评定计算机管理系统的开发．焊接技术，2001，(5)：23～24

70 魏艳红，刘爱国等．基于Client/Server模式的焊接工艺文件管理数据库系统．焊接，2000，(6)：22～25

71 魏艳红，卢静等．焊接工艺文件管理与编制．焊接，1999，(10)：11～13

72 胡小建．焊接数据库及弧焊工艺评定系统．焊接技术，1998，(3)：39～40

73 周昌玉，朱薇等．压力容器焊接工艺卡的计算机管理系统．南京化工大学学报，1996，18 (4)：69～73

74 白英彩，唐冶文，余巍编著．计算机集成制造系统：CIMS概论．北京：清华大学出版社，1997

75 王先逵．计算机辅助制造．北京：清华大学出版社，1999

76 赵良才．计算机辅助工艺设计．北京：机械工业出版社，1995

77 Drews P. et al. Welding in the Century of Information. Proc. of International Conference of IIW. Beijing, Sept. 1994, 3～22

78 陈丙森．计算机辅助焊接技术（CAW）与焊接工程软件．第八次全国焊接会议论文集（第1册）．机械工业出版社，1997：90～108

79 Sugitani Y. et al. CIM in Welding Fabrication (Final Report). IIW Doc. XII－1552－98, Hamburg. Germany, 1998

80 Nakata. Y. et al. Present Status and Future Trend of Welding Automation under CIMS Implementations. Welding Technique, Dec. 1997: 97～106

81 Budgivars S. Computer Aided Welding (CAW). －The State of the Art. IIW Doc. XII－1226－91. Hague. Netherlands, 1991

82 Lucas W. Computer Aided Welding Software in UK. IIW Doc. XII－1449－96. Budapest. Hungary, 1996

83 Siewert T. A. Computer Aided Welding Software in the Americas. IIW Doc. XII－1450－96. Budapest. Hungary, 1996

84 Dilthey U. Roosen. S. Computer Aided Welding in Central Europe. IIW Doc. XII－1451－96. Budapest. Hungary, 1996

85 Peng Jinning, Chen Bingsen. Computer Aided Welding in China. IIW Doc. XII－1453－96. Budapest. Hungary, 1996

86 Roosen S. New Welding Software in Germany. IIW Doc. XII－1554－98. Hamburg. Germany, 1998

87 Kutsuma. M. et al. Computer Aided Welding (CAW) System in Japan. IIW Doc. XII－1551－98. Hamburg. Germany, 1998

88 Hale G, et al. Joint IT－An Interactive On－Line Knowledge Base. Denmark, 10th International Conference, Computer Technology in Welding Manufacturing, 2000, 4－53/4－59

89 Pedersen T. The Next Generation Software for Welding Specification Management. Denmark, 10th International Conference, Computer Technology in Welding Manufacturing, 2000, 4－39/4－43

90 Bernasek M. A Fabricators Use of An Intelligent Welding Procedure Management System. Denmark, 10th International Conference, Computer Technology in Welding Manufacturing, 2000, 4～31/4－37

91 Kranedonk A. Robot Integrated Welding Technology. The 7th International Symposium of Japan Welding Society, Today and Tomorrow in Science and Technology of Welding and Joining, 2001, 39～48

92 Dilthey U, et al. MAGSIM and SPOTSIM－Simulation of GMA and Spot Welding for Training and Industrial Application. The 7th International Symposium of Japan Welding Society; Today and Tomorrow in Science and Technology of Welding and Joining, 2001, 57～62

93 Kim D, Rhee S. Optimization Arc Welding Process Parameters Using Genetic Algorithm. Welding Journal, 2001, (7):



184～189
94 Brightmore A. Computerising Your Welding Information. Welding & Metal Fabrication, 2001, (4): 12～14
95 Campell D. The Future Factory is Digital. Welding & Metal Fabrication, 1998, (7): 12～16
96 Quinn T. et al. A Welding Cell with Its Own Web Site. Welding Journal, 2000, Jun. 46～48
97 胡小建，徐道荣，解正瑞，王云．压力容器弧焊工艺参数推定系统．压力容器，2002，19（5）：27～29
98 张小川，刘书华．激光加工数据库查询系统的设计．焊接技术，2002，(6)：28～29
99 郭愚岷，陈增光．焊接CCT图分析及最佳焊接规范选择专家系统研制．钢结构，1999，14（1）：27～31
100 祁文军．电子版焊接CCT图的制作与应用．热加工工艺，2004，(7)：22～24
101 王学东．焊接材料数据库管理系统．沈阳工业大学学报，2001，23（3）：192～195
102 高云鹏，陈宝平．焊接培训管理系统的开发与应用．焊接，2004，(1)：26～29
103 任岚明，江殊，盛智明．焊工培训管理软件的开发和应用．吉林电力．2001，(1)：36～37
104 刘政军，孙波，张许庆．压力容器焊接技术及焊工培训档案微机管理．沈阳工业大学学报，1996，18（4）：89～94
105 林贵川，王世文．《焊接培训管理系统》软件的开发和应用．电焊机，1998，(1)：39～40
106 陈祖福，余森，田晓虎．焊工培训档案管理系统．电焊机，1998，(2)：40～42
107 蓝或，李宪红，陆浩，VisualFoxPro6.0在焊工档案管理中的应用．焊接，2003，(7)：33～35
108 刘丰，魏艳红，庞忠瑞，刘古文．基于Browser/Server的焊工档案管理系统．焊接，2004，(2)：30～33
109 叶峰，宋永伦，康新龙，欧阳莹，陈富根，丁秀墚．用于汽车部件制造的焊接质量数据库．华南理工大学学报，2001，29（5）：14～16
110 康新龙，宋永伦，叶峰，陈富根，丁秀墚．具有统计过程控制的焊接质量数据库．汽车技术，1999（12）：26～28
111 胡玉杰，徐峰．焊接生产信息管理系统的研究和应用．一重技术，2002，(4)：59～60
112 曲广学，庞忠瑞，刘古文．焊接资源管理计算机支持协同工作系统．焊接，2002，(9)：35～36
113 罗键，殷咸青，单茂华，罗乾．一个基于Windows平台的焊工资格及生产质量管理系统的研制．机械科学与技术．1999，18（4）：623～625
114 宗培，邵国良，曹雷，彭飞．船舶建造过程中焊接质量数据的追溯．船舶工程，2003，25（3）：62～64
115 张林根，宗培，邵国良，曹雷．焊接质量管理系统．焊接，2002，(7)：18～21
116 张春华，李迪．基于数据挖掘的焊接生产管理平台．焊接学报，2002，23（6）：21～25
117 王晋生，李广生，陈丽中，陈嗣光．焊接技术标准与信息动态计算机管理系统．重型机械科技，2002，(3)：28～30
118 王学东．焊接国家标准查询系统．沈阳工业大学学报．2001，23（1）：15～17
119 王行言，俞盘祥，汤荷美，黄维通．计算机信息管理基础．北京：高等教育出版社，1999
120 柴跃廷，刘义．应用软件系统开发．北京：清华大学出版社，1999
121 李存斌．数据库应用技术-SQL Server 2000简明教程．北京：中国水利电力出版社，2001
122 李真文．SQL Server 2000开发人员指南．北京：北京希望电子出版社，2001
123 张海棠．Visual C++6.0编程指南．北京：航空工业出版社，1999
124 郑人杰，殷人昆，陶永雷．实用软件工程．北京：清华大学出版社，1997
125 张维明，宁枫．计算机信息系统分析与设计．合肥：国防科技大学出版社，1991
126 黎达．计算机信息系统分析与设计．北京：中国科学技术出版社，1989
127 崔华，刘九评．ORACLE、SYBASE、INFORMIX三种主要数据库产品综述．电脑技术，1996，(5)：7～10
128 宁家骏．蓬勃发展未有穷期-不断进步的数据库应用平台．中国计算机用户，1995，(7)：15～17
129 谭林．由POWER BUILDER看当前数据库前端开发工具技术．PC世界，1996，(4)：32～34
130 薛立新，陈荣春，王海瑶．数据库SQL查询的优化方法．河北建筑科技学院学报，2003，(1)：30～32
131 丁益民，朱蓉．数据库管理系统的安全保护技术．武汉交通管理干部学院学报，2003，(2)：80～83
132 Janet Perna．数据库的未来．软件世界，2003，(6)：88～89
133 周立柱．数据库技术发展的分水岭．软件世界，2003（7）：86～87
134 张剑，王炎修，刘倩．关于分布式数据库事务处理机制的探讨．山东科技大学学报，2003，(2)：111～113
135 章美月，胡建华，薛秀谦，项树林．基于Web的数据库访问技术．计算机与现代化，2003，(7)：77～80
136 D.Ceglarek, J.Shi, S.M.Wu. A Knowledge－Based Diagnostic Approach for the Launch of the Auto－body Assembly Processe. Journal of Engineering for Industry. 1994, 11 (116): 491～499
137 林志航．计算机辅助质量系统．北京：机械工业出版社，1999
138 段桂江，高连声．CIMS环境下集成化计算机辅助质量系统框架模型研究．计算机集成制造系统．1997，(10)：25～28
139 杨海，杨小虎．基于流水线装配型生产的计算机辅助工序质量管理．计算机集成制造系统．2000，6（3）：86～90
140 沈利冰，来新民．轿车车身装配产品结构关系树系统的建立．上海汽车．1999，(8)：10～13
141 D.Ceglarek, J.Shi. Design Evaluation of Sheet Metal Joints for Dimension Integrity. Transaction of ASME. 1998, 5: 452～460
142 D.Ceglarek, J.Shi. Fixture failure diagnosis for autobody assembly using pattern recognition. Journal of Engineering for Industry. 1996, 118 (11): 55－66
143 S.C LIU, S.J HU. A Parametric Study Of Joint Performance In sheet metal assembly. Int.J.Mach.Tools Manufact. 1997,



37: 873~884
144 林忠钦，胡敏．轿车车体装配偏差研究方法综述．机械设计与研究．1999，(3)：58~60
145 杨健等，污染控制技术的清洁性及其LCA评估，环境科学与技术，2002，25 (2)：28~29
146 蔡九菊等，钢铁企业投入产出模型及吨钢能耗和环境负荷分析，黄金学报，2001，3 (4)：306~312
147 周和敏等，钢铁工业清洁生产的多目标模糊评价，钢铁研究学报，2001，13 (6)：23~26
148 Contrersas，G.R.，Chan - yeung，M，Bronchial reactions to exposure to welding fumes，Occupational Health and Industrial Medicine，1998，38 (2)：91~92
149 任效乾，王荣祥．焊接烟尘的危害及其防治措施，矿山机械，2000，6
150 Hjollund．Niels Henrik I etc，A follow - up study of male exposure to welding and time to pregnancy，Reproductive Toxicology，1998，12 (1)：29~37
151 Xin，Z. and T.H.North，Fume generation during solid - and metal cored wire welding，Welding Research Supplement，July 2001，173 - s - 183 - s
152 Antonini James M.，etc，Freshly generated stainless steel welding fume induces greater lung inflammation in rats as compared to aged fume，Toxicology Letters，1998，98 (1~2)：77~86
153 Tenkate T，Personal ultraviolet radiation exposure of workers in a welding environment．IIW - VIII - 1817 - 97
154 Hewitt Peter J，Strategies for risk assessment and control in welding: challenges for developing countries，The Annals of Occupational Hygiene，2001，45 (4)：295~298
155 杨桂茹等，焊接烟尘的影响因素及其防护措施，焊接 2002 (7)：35~36
156 Zimmer．Anthony T，etc，Characterization of the aerosols resulting form arc welding processes，Journal of Aerosol Science，2001，32 (8)：993~1008
157 肖诗祥等，焊条药皮物质对其可吸入尘量的影响，武汉交通科技大 学学报，1997，21 (4)：447~451
158 Chung．K.Y .K，etc，Particle - size analysis of welding fume，Journal of Aerosol Science，1997，28 (2)：339
159 Dennis．John H，etc，A model for prediction of fume formation rate in gas metal arc welding (GMAW)，globular and spray modes，DC electrode positive，The Annals of Occupational Hygiene，2001，45 (2)：105~113
160 Nakadate．T，etc，Change in obstructive pulmonary function as a result of cumulative exposure to welding fumes as determined by magnetopneumography in Japanese arc welders，Occupational Health and Industrial Medicine，1998，39 (6)：260
161 Wuming，Effective Filter Design for Industrial Fume Purification Filtration and Separation，1998，35 (2)：137~139
162 Niemela．Raimo，etc，Stratification of welding fumes and grinding particles in a large factory hall equipped with displacement ventilation，The Annals of Occupational Hygiene，2001，45 (6)：467~471



第 8 篇

焊接生产质量管理与无损检测

主 编 解应龙

编 写 解应龙 钱 强

陈 宇 邓义刚

审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会

中国材料研究学会

中国材料工程大典编委会



第1章　焊接生产的质量管理

1　概述

焊接生产的质量管理是指从事焊接生产或工程施工的企业通过建立质量管理体系发挥质量管理职能，进而有效地控制焊接产品质量的全过程。这里的质量即产品满足用户“使用要求”的性能及品质，并且满足相应的标准、规范、合同或第三方的有关规定。就企业而言强化焊接质量管理不仅有助于产品质量的提高，达到向用户提供满足使用要求的产品的目的，而且可以推动企业的技术进步，提高企业的经济效益，增强产品的市场竞争能力。

2　质量管理和质量管理体系

2.1　定义

1）质量管理　在质量方面指挥和控制组织的协调的活动。

组织的管理有许多方面，如：经营方针和目标、行政管理、物流管理、财务管理、生产管理、技术管理、环境管理、安全管理以及质量管理等。质量管理只是企业管理的一部分，它涉及到各类管理中与产品质量有关的部分。

质量管理通常包括：质量方针和质量目标的建立、质量策划、质量控制、质量保证和质量改进。这就是指挥和控制组织的活动的基本内容。“协调的”活动是指上述6个方面应协调一致。

2）质量管理体系　在质量方面，指挥和控制组织的管理体系。

体系是指相互关联或相互作用的一组要素。要素是指构成体系的基本单元，可将其细化为：组织结构、程序、过程和资源。其中，组织结构是指人员的职责、权限和相互关系的有序安排；资源是指人员、资金、基础设施、技术和方法、信息等，是个广义的概念。

管理体系是指建立方针和目标并实现这些目标的体系。

将质量管理和管理体系的概念融合在一起则不难描述质量管理体系的含义。通常为有效地开展质量管理活动，应该建立质量管理体系，即应制定质量方针和目标，并通过质量策划、质量控制、质量保证和质量改进活动来实现质量目标。为确保这些活动的有效性，则必须对人员的职责、权限和相互关系做出有序安排，配备所需的资源，识别并管理所需的过程以及制订相应的控制程序。应该指出，质量管理体系只是组织的管理体系的一个重要的组成部分，应使组织的各种管理体系能协调而高效地实现组织的总目标。

2.2　质量管理的发展

由于质量管理在提高产品质量、提高工作效率、增加经济效益、保障市场开拓和增强市场竞争力等方面的显著作用，伴随着国民经济发展、科技进步，质量管理也在不断地适应新的需要，有一个持续发展和逐步完善的历程。就世界范围而言，质量管理有几次大的飞跃，如图8.1-1所示，质量管理随市场竞争不断发展与创新。

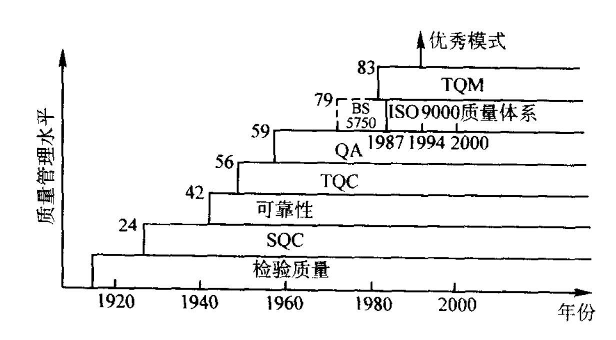


图8.1-1　质量管理的发展

2.3　ISO 9000族的构成

质量管理体系是建立在ISO 9000基础之上的，ISO 9000族的构成如表8.1-1所示。

表8.1-1　ISO 9000族及有关指导文件构成

核心标准	其他标准	技术报告①	小册子	技术规范
ISO 9000 ISO 9001 ISO 9004 ISO 19011	ISO 10012②	ISO 10006 ISO 10007 ISO/TR 10013 ISO/TR 10014 ISO/TR 10015 ISO 10017	·质量管理原理 ·选择和使用指南 ·小型企业的应用	ISO/TR 16949：2002 质量体系要求—汽车供应商　关于应用ISO 9001：2000的特别要求

①　技术报告将以ISO/TR×××××的形式，经过修订予以发布。

②　ISO 10012将把现有的两个分标准经修订后合为一个标准发布。

现有相关标准内容如下：

ISO 9000：2000　质量管理体系——基础和术语

ISO 9001：2000　质量管理体系——要求

ISO 9004：2000　质量管理体系——业绩改进指南

ISO 19011：2002　质量和（或）环境管理体系审核指南

ISO 10012 ISO 10012—1：1994　测量设备的质量保证要求—计量确认体系

ISO 10012 ISO 10012—2：1997　测量设备的质量保证要求—测量过程控制指南

ISO 10006：1997　项目管理指南

ISO 10007：1995　技术状态管理指南

ISO/TR 10013：2001　质量管理体系文件指南

ISO/TR 10014：1998　质量经济性管理指南

ISO/TR 10015：1999　质量管理培训指南

ISO/TR 10017：1999　用于ISO 9001：1994的统计技术指南

2.4 质量管理的八项基本原则

提出质量管理的八项基本原则无疑是2000版ISO 9000标准的一个重大进展。这八项基本原则是在吸收戴明、朱兰等质量大师的质量管理思想和世界上众多优秀企业实施TQM的成功经验的基础上，并参考质量管理的先进标准（如QS9000、VDA6.1等）和优秀质量管理模式（如美国的波多里奇国家质量奖），总结提炼出来的。它是当代质量管理的理论基础，它不仅可以指导组织按ISO9001建立质量管理体系，按ISO9004完善质量管理体系，同时也是实施TQM必须遵从的基本原则。因此，这些原则具有长远的指导意义。

对于一个组织来说，这些原则不仅应成为制定质量方针、质量目标和编制质量管理体系文件时应贯彻的基本精神，而且应是拟定长期质量战略的基本依据。一个组织只有在其质量管理体系中，全面和充分地体现了这八项基本原则，才可能持续取得良好的绩效。

1）以顾客为关注焦点 ISO9000：2000作为质量管理的第一个基本原则，提出：组织依存于顾客。因此，组织应当理解顾客当前和未来的需求，满足顾客要求，并争取超越顾客期望。

以顾客为关注焦点，就要贯彻顾客优先的原则，在处理相关方的关系时，顾客是第一位的。否则其他受益的各方的利益都难以保证。

2）领导作用 按ISO9001：2000的规定，领导作用是指：领导者确立本组织的宗旨及方向。他们应当创造并保持使员工能充分参与实现组织目标的内部环境。

这里讲的领导作用，主要是针对最高管理者的，但对于其他各层管理者，在自己管辖的范围内，也应发挥相应的作用。

3）全员参与 其原则是指：各级人员都是组织之本，只有他们的充分参与，才能使他们的才干为组织带来收益。

全员参与是各种管理成功的必要条件。传统的全员参与质量管理是指不仅需要高层领导充分发挥领导作用，而且需要各级管理者、各类专业技术人员、管理人员和操作人员都投入到质量管理中来。只有全体员工共同努力，质量管理才能取得成功。

4）过程方法 其原则是指：将活动和相关资源作为过程进行管理，可以更高效地得到期望的结果。系统地识别和管理组织所应用的过程、特别是这些过程之间的相互作用，称为"过程方法"。

5）管理的系统方法 其原则是指：将相互关联的过程作为系统加以识别、理解和管理，有助于组织提高实现目标的有效性和效率。

在表8.1-2中比较了"过程方法"和"管理的系统方法"的区别。

由表8.1-2可见，管理的系统方法着眼于整个组织的体系，是用来管理体系全局的，而过程方法则是针对所需过程的管理，属于局部范围的控制。可以说系统管理属于宏观管理的范畴，而过程管理则属于微观管理的范畴。显然，过程方法是管理的系统方法的基础。

表8.1-2 过程方法和管理的系统方法的比较

项目＼方法	过程方法	管理的系统方法
对象	单个过程及其包括的若干活动	整个体系（系统），包括若干过程及其网络
目的	达到过程目标	提高组织实现总目标的有效性和效率
管理要点	1）系统地识别和确定所需过程和活动 2）明确管理职责和权限 3）分析和测量关键活动的能力 4）识别与过程相关的接口 5）注意改进过程的影响因素	1）建立体系，以实现组织目标 2）设定组织的总目标和各职能、过程的分目标 3）协调职能和职责，减少职能和职责交叉的障碍 4）评估组织的能力，识别资源的局限性 5）识别体系内过程的相互依赖关系 6）通过测量和评估持续改进体系

6）持续改进 其原则是指：持续改进总体业绩应当是组织的一个永恒目标。

持续改进是企业发展、增强参与市场竞争能力并取得优胜的一个重要条件。这是因为市场千变万化、顾客的需求和期望增多且越来越高、竞争对手在前进、同行业的产品水平和管理水平不断提高、人才竞争日趋激烈、时代在前进、技术在进步，若总以老产品、老面孔、老的管理模式来应对这种变化，则随着时间的推移，迟早会被顾客抛弃。

市场严格遵循适者生存的规律。因此，企业必须在经营理念、组织体制、运行机制、人员素质、产品适应性和新产品超值诸方面进行改进，以改善企业的总体业绩、提高竞争实力并让所有相关方都满意。由于改进是无止境的，所以持续改进应是组织的永恒目标。组织要在市场竞争中立于不败之地，就必须适应这种永恒变化的环境，坚持持续改进。持续改进也是一个过程，为此对其应进行动态管理。若不能持续地不间断地进行，则如"逆水行舟"，不进则退。

7）基于事实的决策方法 其原则是指：有效决策应建立在数据和信息分析的基础上。

对数据和信息的分析可为决策科学化提供依据，在这些分析结果的基础上再加上经验和直觉作出判断，确认分析结果的可靠性，从而作出正确的决策。

在进行任何策划活动时，都要占有大量的数据和信息，在进行数据分析之后，再参照经验和直觉，完成策划方案。这样做出的方案，依据是充分的，结果将会是有效的。

8）与供方互利的关系 其原则是指：组织与供方建立相互依存、互利的关系，可增强双方创造价值的能力。

随着生产社会化的不断发展，组织的生产活动分工越来越细，专业化程度越来越高，促进生产技术水平越来越高，产品质量也相应大幅度提高。通常某一产品不可能由一个企业从原材料开始加工、装配直至形成顾客使用的产品。往往是通过多个组织分工协作，即通过供应链来完成的。因此，任何一个组织都有其供方或合作伙伴。供方提供的高质量产品将使组织为顾客提供高质量产品得到保证，最终确保顾客满意。组织的市场扩大，则为供方和合作伙伴增加了提供更多产品的机会。所以，组织与供方合作与交流是非常重要的。它将最终促使组织与供方都增强了创造价值的能力，优化成本和资源，对市场和顾客需求联合起来作出快速的反应，从而使双方都可获得更多的效益，形成双赢的局面。



2.5 质量管理体系

2.5.1 质量管理体系的目的和作用

(1) 质量管理体系的目的

质量管理体系能够帮助组织增强顾客满意，提供持续满足要求的产品，向组织及其顾客提供信任。

每个组织都有自己的产品，并希望所提供的产品能让顾客满意。顾客要求产品应当具有其所需求的特性。顾客的要求由顾客以合同方式来规定或由组织自行识别，如何保证这种识别是充分的（即包括顾客明示的、隐含的以及法律法规的要求），是达到顾客满意的前提。

在产品实现过程中，组织通过产品规范来确保这些要求得到满足。在任何情况下，组织所提供的产品是否会被顾客接受并让顾客满意，是由顾客决定的。然而质量管理体系可帮助组织充分理解顾客的需求和期望并加以满足，为使顾客满意创造了重要条件。

每个组织都会面临市场不断变化，顾客的期望和需求多变、技术发展以及同行业竞争的压力，这些都将促使组织持续改进其产品和过程，并进一步提高质量管理体系的有效性。

(2) 质量管理体系的作用

1) 向组织及其顾客和其他相关方提供信任　这种信任首先是指对以下方面的信任：质量管理体系的要求已得到满足；已经建立了文件化的质量管理体系并得到有效实施；组织有能力贯彻实施其质量方针做出的承诺和实现其质量目标。

其次是对组织能够提供持续满足要求的产品的信任。这两方面的信任对组织来说具有重要的意义，对其不断开拓市场是非常关键的。

2) 引导组织分析顾客需求并满足顾客需求　产品实现过程从分析顾客需求开始，规定满足这些要求的实现过程及有关的支持过程，并使这些过程都处于受控状态，从而确保能向顾客提供可接受的产品。

3) 提供持续改进框架，增加顾客和其他相关方的满意程度　按照质量管理体系的总要求和各个过程的要求运行，能适应顾客需求和期望的变化。按照 PDCA 循环规律，可以不断找出改进的机会和措施，最终必然导致顾客和其他相关方对组织及其产品更为满意。

4) 提高组织竞争力　组织的竞争力由许多因素构成，如价值观、综合实力、产品质量、成本、形象、信誉、顾客满意程度等，但其核心是适应市场的能力。质量管理体系能帮助组织在上述诸方面增强竞争力，从而获得更多的市场空间和效益。

2.5.2 质量管理体系要求与产品要求

质量管理体系要求与产品要求是两个不同范畴的概念，应进行明确区分。质量管理体系要求不能代替产品要求，它是为保证产品要求实现而对管理过程提出的要求。从这个意义上说，质量管理体系要求是对产品要求的补充。反之，产品要求也不能代替质量管理体系要求。推而广之各项技术和业务活动的要求同样不能代替质量管理体系要求。

因此，对于一个组织来说两者不可偏废，而应一并考虑。

在表 8.1-3 中列出了质量管理体系要求和产品要求的区别。

表 8.1-3　质量管理体系要求和产品要求的区别

项　目	质量管理体系要求	产 品 要 求
含义	1）对质量管理体系的固有特性提出的要求 2）质量管理体系的固有特性是指：满足质量方针和目标的能力，体系的协调性、完整性、自我完善机制、适宜性和有效性等	1）对产品的固有特性提出的要求 2）产品的固有特征是指：对产品的物理的、感观的、功能的、行为的、时间的和人体功效等方面的要求
目的	1）证实组织有能力稳定地提供满足顾客和法律法规要求的产品 2）证实组织有能力履行所作的承诺，有能力实现其目标，并通过持续改进增强顾客满意	按产品要求制定相应的规范，以保证在产品实现过程中达到要求并验收产品满足顾客要求
适用范围	各类组织的通用要求	特定产品
表达形式	质量管理体系要求标准（如 ISO 9001）或法律法规要求	产品标准、技术规范、合同协议、法律法规及有关过程标准
要求的提出	可由顾客或组织自行提出所采用的质量管理体系标准（如 ISO 9001）	1）法律法规及强制性标准 2）顾客规定 3）组织通过市场预测进行规定
相互关系	质量管理体系要求本身不规定产品要求，但它是对产品要求的补充	

2.5.3 质量管理体系的实现

虽然质量管理体系的基本过程有其共性（如四大板块：管理职责；资源；产品实现；测量、分析和改进），但对一个组织来说，其具体过程是千差万别的。因此，首先要识别组织自己所需要的过程，对现有过程进行分析与评价，搞清哪些是非增值的？哪些尚有增值的潜力？如何缩短从顾客提出要求到产品交付给顾客的响应周期？在这个基础上，才能建立适合于组织自己而又有更高效率和效益的体系。

质量管理体系必须文件化，质量管理体系建立的标志是体系文件（如质量手册、程序、作业指导书、质量记录等）的形成。

在对体系的总体策划与设计的基础上，建立起形成文件的质量管理体系，建立文件中规定对体系要求的实施方法和措施。

质量管理体系贵在实施一个好的文件化体系，如不投入运行，就不能起什么作用。当前普遍存在的文件规定和实际实施“两层皮”的问题，来源于文件的编制者没有充分考虑到操作的可行性并跟踪实际运行情况，

这就属于“先天不足”；在实施中，由于内部沟通不足，对不可操作的文件没有信息反馈，致使“两层皮”问题长期存在，这属于“后天失调”。

编写一套体系文件，建立体系是容易的，但要付诸实施则非易事，而要保持有效运行则更难。这里特别需要高层领导持之以恒，并在组织中对实施中的业绩建立一套监督、考



核、奖惩制度。

3 焊接生产质量管理

3.1 焊接质量技术要求

焊接作为一种特殊的加工工艺，有其特殊的质量要求。

ISO 3834－1～4《焊接质量技术要求——金属材料熔化焊》即根据 ISO 9000 系列标准的质量保证原则，结合焊接实际应用条件，描述了保证焊接质量、质量体系应包括的焊接质量要求。我国已将此标准等同转化为国家标准 GB/T12467－1～4，欧洲标准等同编号为 EN729－1～4。

ISO 3834 分四个部分：

ISO 3834－1 选择和使用指南（本文简称标准 1）

ISO 3834－2 完整质量要求（本文简称标准 2）

ISO 3834－3 一般质量要求（本文简称标准 3）

ISO 3834－4 基本质量要求（本文简称标准 4）

3.1.1 选择及使用指南

适用范围指南描述了适合于以焊接为一种制造手段的企业所应用的焊接质量要求。这些焊接质量要求的提出使之可适用于任何类型熔焊焊接结构的制造。并为描述一个企业是否能生产规定质量焊接结构的能力提供了指导。该指南亦可被任何有关一方用做评价某一企业焊接质量措施的基础。

该指南还可做为制订规程或合同要求及企业管理的准则以确定与焊接结构类型有关的质量体系中的焊接要求。

该指南可用于下列目的。

1）提供 ISO 9000 系列标准中要求的说明，指导与焊接（被视为特殊工艺）控制有关的质量体系部分的规定及建立。

2）为建立符合 ISO 9000 质量体系中未包含的规定及焊接质量要求提供指南。

3）评价上述 1）或 2）所涉及的焊接质量要求。

其应用将典型地出现在下列情况。

在合同环境中：确定质量体系的焊接要求。

焊接质量要求的选择见表 8.1-4 和图 8.1-2，关于 ISO 3834－2、ISO 3834－3 及 ISO 3834－4 焊接质量要求的总体对比见表 8.1-5。

表 8.1-4 焊接质量要求的选择

合同的焊接要求	质量要求	
	当要求质量体系符合 ISO 9000 时	当要求质量体系不同于 ISO 9000 时
	使用	使用
完整质量要求	ISO 3834－2①	ISO3834－2
一般质量要求	ISO3834－2	ISO3834－3
基本质量要求	ISO3834－2	ISO3834－4

① 在 ISO 9000 的适用范围内，ISO 3834－2 的要求可能被减至合适的程度以适用于焊接结构的类型。

下面为了便于比较，将标准 2、3、4 的相同项目顺序列出。

3.1.2 标准 2、标准 3 和标准 4 间的区别

（1）适用范围

1）标准 2 的制订使之：

① 与将被制造的焊接结构类型无关；

② 对车间焊接及现场焊接的质量要求予以确定；

③ 为表述某一制造商生产满足规定要求焊接结构的能力提供指南；

④ 可用作评价制造商焊接能力的基础。

当在下列一种或多种情况下，要求展示某一制造商生产焊接结构及满足规定质量要求的能力时，本标准使用于：

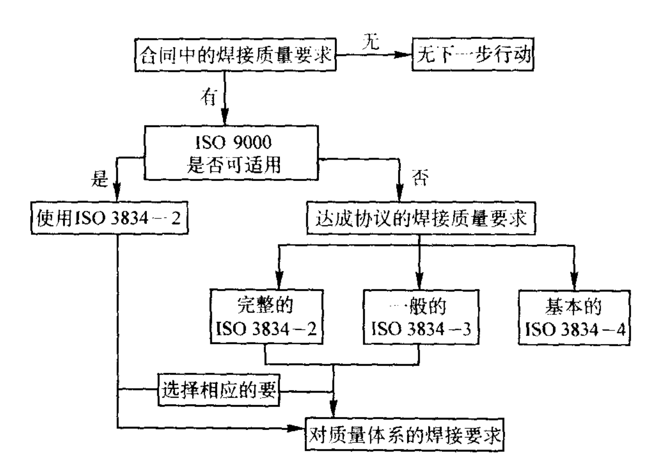


图 8.1-2 焊接质量要求选择的流程图

① 有关各方面的合同；

② 应用的标准；

③ 常规要求。

本标准的这些要求可由制造商完全采用，如对所涉及的结构不适用时，也可有选择地删除。在下述条件下，这些要求为焊接控制提供了适用的框架。

条件 1：对合同中的熔化焊接提供专门的要求（合同要求制造商具备符合 ISO 9000 的质量体系）。

条件 2：对合同中的熔化焊接提供专门的要求（合同要求制造商具备不同于 ISO 9000 的质量体系）。

条件 3：对熔化焊接提供专门的要求作为制造商建立一个质量体系的指南。

条件 4：为应用标准（这些标准包含有熔焊部分要求）或有关各方间合同中的参照依据提供专门的要求。然而这类情况可能更适合于 ISO 3834－3 或 ISO 3834－4 标准。

2）标准 3 与标准 2 不同之处在于“条件”。

条件 1：对合同中的熔化焊接提供专门的要求（合同要求制造商具备不同于 ISO 9000 的质量体系）。

条件 2：对熔化焊接提供专门的要求作为制造商建立一个质量体系的指南。

条件 3：为应用标准（这些标准包含有熔化焊部分要求）或有关各方面合同中的参照依据提供专门的要求。然而这类情况可能更适合于采用 ISO 3834－4 标准。

3）标准 4 与标准 2、3 不同之处也是“条件”。

条件 1：对合同中的熔化焊接提供专门的要求（合同要求制造商具备不同于 ISO 9000 的质量体系，而且文件化的焊接控制对于最终结构的完整性而言不具有主要作用）。

条件 2：对熔化焊接提供专门的要求作为制造商建立一个质量体系的指南。

条件 3：为应用标准（这些标准包含有熔化焊部分要求）或有关各方面合同中的参照依据提供专门的要求。

可以说，“条件”是选用哪个标准的主要依据。

从三者的引用标准也可以看出，标准 4 的质量要求比前两个要低。

（2）标准 2、3、4 的焊接质量要求

表 8.1-5 是三个标准的焊接质量要求总体对比。表中要素栏列出了所有质量要求项目。可以看出有的项目，例如焊工，三个标准要求一致；而焊后热处理项，标准 2 是“需要规程及完成的记录”，标准 3 是“需要对规程作确认”，标准 4 是“无要求”，三个标准的要求则是各不相同。因而通过表 8.1-5，读者可以一目了然地看出三个标准在同一项目中要求的差别所在。也可以查到每个标准对每项的要求程度，表 8.1-5 是 3 个标准的项目一览表，读者可以先看本表，再根据需要去查标准中的有关部分。



表 8.1-5　关于 ISO 3834－2、ISO 3834－3 及 ISO 3834－4 焊接质量要求的总体对比

要　　素	ISO 3834－2（完整质量要求）	ISO 3834－3（一般质量要求）	ISO 3834－4（基本质量要求）
合同评审	所有文件的评审	评审范围稍小	建立这种能力并具备信息手段
设计评审	确认焊接的设计		
分承包商	按主要制造商对待		应符合所有要求
焊工	按 ISO 9606 或有关标准认可		
焊接管理人员	具有相应技术知识（ISO 14731）的焊接协作人员或类似知识的人员		无要求，但制造商的人员责任除外
检验人员	具有足够的、胜任的人员		足够并胜任、必要时从它方获得
生产设备	对制备、切割、焊接、运输、起重及安全设备和防护服均有要求		无特殊要求
设备维修	要进行，维修计划是必需的	无特殊要求，合适即可	无要求
生产计划	需要有限度的计划	需要有限度的计划	无要求
焊接工艺规程（WPS）	向焊工提供作业指导书（ISO 9956－2）		无要求
焊接工艺评定	符合 ISO 9956 的相应部分，按应用标准或合同要求进行评定		无特殊要求
工作指令	具有焊接工艺规程（WPS）或明确工作指令		无要求
文件	必需的	未规定	无要求
焊接材料的批量试验	只在合同有规定时进行	未规定	无要求
焊接材料的储存及保管	按供货商提供的最低要求		
母材的存放	要求避免环境的影响；保持标志		无要求
焊后热处理	需要规程及完成的记录	需要对规程作确认	无要求
焊前，焊时与焊后检验	按规定的操作要求		按合同规定的职责
不符合项	具有一定措施		
校准	具有一定措施	无规定	
标志	一般有要求	必要时有要求	无规定
可追溯性			无规定
质量记录	由合同要求需要、以满足产品可靠性规则	由合同要求	
	保存至少 5 年以上		

3.2　ISO 3834－2“完整质量要求”节选

（1）合同及设计评审

1）总则　制造商应对合同要求及用户提出的设计数据或制造商对结构设计的内部数据进行评审。这样可确保在工作开始前，获得实施制造操作所有必要的信息。制造商必须确认其满足所有焊接合同要求的能力并确保全部质量活动的充分准备。

合同评审由制造商实施以确保：合同处于其力所能及的范围；其有足够的条件保证按期付货；文件是清楚而明确的。制造商应确保合同与先前投标文件间的所有变动便于识别，并通知用户所有程序、成本或可能引起的工程变动。

在合同评审时（或之前），4.2 中的款项应予以重点考虑。4.3 中的款项构成了设计评审的一般内容，如果设计不是制造商做的，在合同评审时，也应予以考虑，并确保由用户提供所有相关的信息。在非合同环境下，即这些项目做备用，制造商在进行设计评审时应考虑 4.2 条中的要求。

2）合同评审　所考虑的合同要求应包括：

① 将使用的应用标准及所有附加要求；，

② 焊接工艺规程、无损检验规程及热处理规程；

③ 焊接工艺评定所使用的方法；

④ 人员的认可；



⑤ 焊后热处理；

⑥ 试验及检验；

⑦ 对材料、焊工及焊缝的选择、标志及（或）可追溯性（见标准中16项）；

⑧ 包括某一独立检验机构任何形式介入在内的质量控制管理；

⑨ 其他焊接要求，如焊接材料的批量试验、焊缝金属铁素体含量、时效、氢含量；

⑩ 有关现场焊接的环境条件，如低温环境条件或任何有必要提供保护的有害气候条件；

⑪ 分承包商；

⑫ 不符合项的管理。

3）设计评审　所考虑的设计要求应包括以下几方面：

① 所有焊缝的位置，可操作性及焊接顺序；

② 表面加工及焊缝剖面图；

③ 母材的技术要求及焊接接头性能；

④ 永久衬垫；

⑤ 在车间或其他地方施焊的焊缝；

⑥ 接头制备及完成后接头的尺寸，细节；

⑦ 特殊方法的使用，如单面焊时不加衬垫获得全焊透；

⑧ 焊缝的质量及合格要求；

⑨ 其他特殊要求，即喷丸、热处理的合格要求。

（2）分承包

当制造商使用分承包服务时（即焊接、检查、无损检验、热处理），应向分承包商提供全部有关的规程及标准。如有必要，分承包商应按制造商的要求提供其此类工作的记录及文件。

所有的分承包商应在制造商的订货指令及职责要求下工作并完全满足本标准的有关要求。

制造商要确保分承包商能满足合同的质量要求。

制造商向分承包商提供的信息应包括所有合同评审（见4.2）及设计评审（见4.3）的有关资料。如果结构的设计将委托分承包的话，可能需要规定附加要求。

（3）焊接人员

1）总则　制造商应按规定的要求配置足够的、胜任的人员从事焊接生产的设计、施工及监督。

2）焊工　所有焊工及焊接操作工应按ISO 9606、ISO 14732或有关标准，经相应的考试后认可。所有认可的记录要保存至其有效时间。

3）焊接管理人员　制造商应按ISO 14731配置合适的焊接管理人员，以保证焊接人员获得必要的工艺规程或作业指导书，使其工作得到正确的实施和控制。对质量活动负有责任的人员应具有足够的权力以保证可采取必要的行动。这些人员的任务、相互关系及职责范围应予以明确地规定。

（4）检查、试验及检验人员

1）总则　制造商应按规定的要求配置足够的、胜任的人员从事焊接生产的检查、试验及检验。

2）无损检测人员应按ISO 9712/EN473或有关标准认可。

（5）设备

1）生产及试验设施　必要时，应配置下列设备：

① 焊接电源及其他机器；

② 接头制备及切割（包括热切割）设备；

③ 预热及焊后热处理设备（包括温度指示仪）；

④ 夹具及固定机具；

⑤ 用于焊接生产的起重及装夹设备；

⑥ 人员防护设备及直接与焊接有关的其他安全设备；

⑦ 用于焊接材料处理的烘干炉、保温筒；

⑧ 清理设施；

⑨ 破坏性试验及无损检验设备。

2）设施的表述　制造商应保存用于焊接生产的基本设备明细表。该明细表应明确对车间容量及能力评估时不少的主要设备款项。例如可包括：

① 最大起重机的容量；

② 车间可装夹的构件尺寸；

③ 机械化或自动化焊接设备的能力；

④ 焊后热处理炉的尺寸及最高温度；

⑤ 平板、弯曲及切割设备的能力。

其他设备只需用包括一般类型在内的大约总数（如用于不同焊接工艺的焊接电源总数）来规定。

3）设备的适用性　设备应适用于所涉及的应用。除非在合同中另有规定，焊接及加热设备一般不要求认可。

4）新设备　新设备（或改造后的设备）安装之后，应进行相应的试验。这些试验要证实设备的正常功能按有关标准进行。这些试验的记录要保存。

5）维修　制造商应具有设备维修的书面计划。计划要确保设备中那些控制焊接工艺规程所列参数的部件的维修检查。这些计划可局限于对确保焊接结构的质量起基本作用的那些项目，如下：

① 热切割设备中的导向状态，机械化焊接的固定机具；

② 用于焊接操作的电流表、电压表、流量计的状态；

③ 电缆、软管、连接器的状态等；

④ 机械化及（或）自动化焊接设备中控制系统的状态；

⑤ 热电偶及其他测温仪的状态；

⑥ 送丝机构及导管的状态。

有故障的设备不得使用。

（6）焊接行为

1）生产计划　制造商应实施适宜的生产计划（适于8.1中的设施），其内容至少要包括：

① 结构制造（即单件、组件及最终总装件）顺序的规定；

② 制造结构所要求的每个工艺的说明；

③ 相应的焊接及相关工艺规程的参照；

④ 必要时的焊接顺序；

⑤ 每个工艺实施时的指令及时间；

⑥ 试验及检验规程（包括任何独立检验机构的介入）；

⑦ 环境条件，即防风、防雨；

⑧ 按批量、零件或部件的物品标识。

2）焊接工艺规程（WPS）　制造商应制订合适的焊接工艺规程并确保其在生产中得到正确运用。

3）焊接工艺认可　焊接工艺应在生产之前按ISO 9956标准或相应标准进行认可，认可方法应符合相应的应用标准合同的规定。

其他工艺（如热处理工艺）只在相关的应用标准及（或）合同中有要求时才做认可。

4）作业指导书　出于指导焊工的目的，制造商可以直接在车间使用焊接工艺规程。或者使用专门的作业指导书。这些专门的作业指导书要来源于认可的焊接工艺规程并且不需要作单独的认可。

5）文件的编制　制造商应建立并保持有关质量文件（即焊接工艺规程、焊接工艺评定记录、焊工合格证书）的控制程序。

（7）焊接材料

1）总则　制造商应根据规定焊接材料控制所包括的责任及程序。

2）批量试验　只有在合同有规定时，才要求对焊接材料作批量试验。

3）储存及保管　制造商应制订并实施可避免焊接材料受潮、氧化及损坏等的贮存、保管及使用程序。这些程序要



符合供货商的建议。

(8) 母材的储存

母材的储存应保证其不受到有害影响，存放期间应保持其识别标志。

(9) 焊后热处理

制造商对任何焊后热处理的规程及实施负全部责任。焊后热处理工艺应适合母材、接头、结构等并符合相应标准及（或）规定的要求。施工过程中要做热处理记录。记录应显示规程已被遵照执行，对特殊的热处理操作应具有可追溯性。

(10) 与焊接相关的试验、检验及检查

1) 总则　在制造过程的相应环节应进行检验、试验及（或）检查以保证满足合同要求。这些检验及（或）试验的部位及次数取决于合同及（或）应用标准、焊接工艺及结构的类型（见标准4.2及标准4.3）。制造商可不受限制地进行附加试验，这类试验不要求报告。

2) 焊前检查　在施焊之前，必要时应作下列检查：

① 焊工考核证书的适用性、有效性；
② 焊接工艺规程的适用性；
③ 母材的识别；
④ 焊接材料的识别；
⑤ 接头的制备；
⑥ 工装、夹具及定位；
⑦ 焊接工艺规程中的任何特殊要求，如防止变形；
⑧ 所有生产试验的安排；
⑨ 焊接工作条件（包括环境）的适宜性。

3) 焊接过程中的检查　在焊接过程中，必要时应在适宜的间隙或以持续的参数做下列检查：

① 主要焊接参数（如果焊接电流、电弧电压及焊接速度)；
② 预热/道间温度（见 ISO 13916)；
③ 焊道的清理与形状，焊缝金属的层数；
④ 根部气刨；
⑤ 焊接顺序；
⑥ 焊接材料的正确使用及保管；
⑦ 变形的控制；
⑧ 所有的中间检查，如尺寸检验。

4) 焊后试验及检验　必要时焊后应检查是否符合合格要求；

① 利用宏观检验；
② 利用无损检验，如按相应的标准；
③ 利用破坏性检验，如按相应的标准；
④ 焊接结构的形式、形状及尺寸；
⑤ 焊后操作的结果及记录，如研磨、焊后热处理、时效。

5) 试验及检验状态　焊接结构的试验及检验状态应采取适当的方式予以说明，诸如：采用物项标识或放置卡片。

(11) 不符合项及改正措施

应采取措施控制不合格品，防止其被误用。制造商进行修复及（或）矫正时，做修复、矫正的所有工作主场点也应具备相应的程序。修复矫正后要按原始要求重新作检验、试验及检查。此外，还要采取必要措施确保不利于焊接结构质量的条件及时被发现并得到纠正。

(12) 检测设备的校准

制造商要对检验、测量和试验设备的适时校准负责。所有用于焊接结构质量评定的设备应做适宜的控制并按规定的期限进行校准。

(13) 标识及可追溯性

在整个制造过程中，应保持标识及可追溯性。

必要时保证焊接操作识别及可追溯性的文件体系可能包括：

1) 生产计划；
2) 跟踪卡片；
3) 结构中焊缝部位的记录；
4) 焊缝标记、钢印、标签等；
5) 对特殊焊缝的可追溯性（包括焊工、焊接操作者在内的全机械化、自动化焊接设备)；
6) 焊工及焊接工艺的认可；
7) 无损检测工艺及人员；
8) 焊接材料，及型号、批号或炉号；
9) 母材，即型号、批号；
10) 修复部位。

(14) 质量记录

必要时，按合同要求的质量记录应包括：

1) 合同/设计评审记录；
2) 材料合格证；
3) 焊接材料合格证；
4) 焊接工艺规程；
5) 焊接工艺评定记录；
6) 焊工或焊接操作者考核证书；
7) 无损检验人员证书；
8) 热处理工艺规程及记录；
9) 无损检验及破坏性试验程序及报告；
10) 尺寸报告；
11) 修复记录及其他不符合项的报告。

在无任何其他规定的要求时，质量记录应至少保持五年。

3.3 ISO 9000族与ISO 3834间的关系

焊接在ISO 9000体系中作为一门特殊工艺，要求专门的针对此项工艺较具体的质量体系，由此出现了ISO 3834。《焊接质量要求—金属材料熔化焊》。也就是说针对焊接这一领域ISO 3834标准是在ISO 9000基础上形成和发展起来的，但与ISO 9000相比，更加有针对性，更加具体，可操作性更强。

如果一个企业按ISO 9000来规范整个质量体系的话，焊接这一领域必须按照ISO 3834－2，即全面质量技术要求来约束；如企业没有ISO 9000认证，则焊接领域可按ISO 3483－2，－3或－4，即全面质量技术要求，标准质量技术要求或基本质量技术要求来约束，或最终由用户或行业法规来要求和约束。

4 焊接企业质量管理要求实例

4.1 我国锅炉压力容器制造监督管理、制造许可、产品安全性能监督检验的规定

4.1.1 锅炉压力容器管理办法

为加强对锅炉压力容器制造的监督管理，保证锅炉压力容器产品的安全性能，保障人身财产安全。从2003年1月1日起，在中华人民共和国境内制造、使用的锅炉压力容器，国家实行新的制造资格许可制度和产品安全性能强制监督检验制度。

境内制造、使用的锅炉压力容器，制造企业必须取得《中华人民共和国锅炉压力容器制造许可证》（以下简称《制造许可证》)。未取得《制造许可证》的企业，其产品不得在境内销售使用。《制造许可证》有效期为4年。锅炉和压力容器分别划分为A、B、C、D四个制造许可级别。见表8.1-6和表8.1-7。



表 8.1-6　锅炉制造许可级别的划分

级　别	制造锅炉范围
A	不限
B	额定蒸汽压力不超过 2.5 MPa 的蒸汽锅炉（表压，下同）
C	额定蒸汽压力不超过 0.8 MPa 且额定蒸发量不超过 1 t/h 的蒸汽锅炉； 额定出水温度小于 120℃的热水锅炉
D	额定蒸汽压力不超过 0.1 MPa 的蒸汽锅炉； 额定出水温度小于 120℃且额定热功率不超过 2.8 MW 的热水锅炉

注：1. 额定出水温度大于及等于 120℃的热水锅炉，按照额定出水压力分属于 C 级及其以上各级。
2. 持有高级别许可证的锅炉制造企业，可以生产低级别的锅炉产品。
3. 持有 C 级及其以上级别许可证的锅炉制造企业，可以制造有机热载体锅炉，对于只制造有机热载体锅炉的制造企业，应申请有机热载体锅炉单项制造资格，不需要定级别。
4. 对于产品种类较单一的制造企业，可对其许可范围进行限制，如限制部件、材质、品种等。
5. 持证锅炉制造企业可以制造与相应级别锅炉配套的分汽缸、分水缸。

表 8.1-7　压力容器制造许可级别的划分

级　别	制造压力容器范围	代　表　产　品
A	超高压容器、高压容器（A1）；压容器、第三类低、中压容器（A2）；球形储罐现场组焊或球壳板制造（A3）；非金属压力容器（A4）；医用氧舱（A5）	A1 应注明单层、锻焊、多层包扎、绕带、热套、绕板、无缝、锻造、管制等结构形式
B	无缝气瓶（B1）；焊接气瓶（B2）；特种气瓶（B3）	B2 注明含（限）溶解乙炔气瓶或液化石油气瓶。B3 注明机动车用、缠绕、非重复充装、真空绝热低温气瓶等
C	铁路罐车（C1）；汽车罐车或长管拖车（C2）；罐式集装箱（C3）	
D	第一类压力容器（D1）；第二类低、中压容器（D2）	

注：1. 一、二、三类压力容器的划分按照（压力容器安全技术监察规程）确定；
2. 超高压容器：设计压力不小于 100 MPa 的压力容器；
高压容器：设计压力不小于 10 MPa 且小于 100 MPa 的压力容器；
中压容器：设计压力不小于 1.6 MPa 且小于 10 MPa 的压力容器；
低压容器：设计压力不小于 0.1 MPa 且小于 1.6 MPa 的压力容器。
3. 按分析设计标准设计的压力容器，其制造企业应持有 A 级或 C 级许可证。
4. 球壳板制造项目含直径不小于 1 800 mm 的各类型封头。
5. 对于产品种类单一的制造企业，应对其许可范围进行限制，如限制产品或制造方法、材质、种类、用途等。

4.1.2　锅炉压力容器制造许可条件

根据《锅炉压力容器制造监督管理办法》，国家质量监督检验检疫总局制定了《锅炉压力容器制造许可条件》、《锅炉压力容器制造许可工作程序》和《锅炉压力容器产品安全性能监督检验规则》，自 2004 年 1 月 1 日起实施。

《锅炉压力容器制造许可条件》由锅炉压力容器制造许可资源条件要求、质量管理体系要求和锅炉、压力容器产品安全质量要求三部分构成。资源条件要求包括基本条件和专项条件，前者是制造各级别锅炉、压力容器产品的通用要求，后者是制造相关级别锅炉、压力容器产品的专项要求，企业应同时满足基本条件和相应的专项条件。

企业必须建立与制造锅炉、压力容器产品相适应的质量管理体系并保证连续有效运转。企业应有持续制造锅炉、压力容器的业绩，以验证锅炉、压力容器质量管理体系的控制能力。

企业的无损检测、热处理和理化性能检验工作，可由本企业承担，也可与具备相应资格或能力的企业签订分包协议，分包协议应向发证机构备案。

（1）锅炉制造许可资源条件

1）基本条件

① 人员要求　锅炉制造企业必须具备适应锅炉制造和管理需要的技术力量。

a）应配备锅炉制造、机械加工、无损检测、焊接、材料、质量管理等各类工程技术人员。A 级、B 级许可证企业工程技术人员比例不少于本企业职工数的 10%，C 级、D 级许可证企业工程技术人员比例不少于本企业职工数的 5%，且不少于 5 人。其中，各级锅炉制造企业必须配备足够数量且能满足制造需要的锅炉和焊接专业技术人员。

b）制造锅炉的各个环节（设计、工艺、材料、冷作、热加工、机加工、成形加工、焊接、无损检测、热处理、压力试验、产品检验、标准化、计量、质量管理等）须有相关责任工程师负责。

c）持证无损检测人员和无损检测项目、持证焊工人数和焊接项目都应能满足实际产品的制造需要。

② 厂房和技术设备要求

a）锅炉制造车间面积、高度应满足所申请级别锅炉产品制造的需要，制造流程应合理布局。锅炉产品承压件的焊接必须保证在室内作业完成。

b）管材及半成品的存放必须有一定的防护措施。

c）对有温度、湿度要求的焊材的存放处应具有保证温度、湿度的设施，具有此类焊材在使用前的烘干和保温的设施。



d）具有能满足防护要求和产品需要的射线无损检测场地，应具有能保证底片冲洗质量和底片保存的基本条件。

e）具有与所制造产品相适应的无损检测设备（无损检测分包时可不要求）。

f）具有满足锅炉产品制造需要的工装设备。

g）主车间起吊能力应能满足产品制造的需要。

h）具有满足锅炉产品制造需要的钻孔和弯管设备。

i）具有满足锅炉产品制造需要的焊接设备。

j）具有满足制造要求所必需的检测平台、检测工具和水压试验设备。

k）具有满足制造需要的力学性能和理化检验设备或有保证质量能力的分包关系。

l）具有能满足制造所申请级别锅炉产品需要的机械加工设备（包括管材、板材的切割、冲压工装设备等）。整装炉的制造企业必须有锅炉产品的制造能力。

2）专项条件（见表8.1-8）：

表8.1-8 锅炉制造许可专项条件

级别	技术力量要求	制造设备和工装要求	检测和试验设备
A级	1）具有与制造产品相适应的金相、理化试验室 2）具有与制造产品相适应的焊接试验室 3）具有新产品的设计开发能力并有足够的将图纸转化为实际制造工艺的能力 4）配备有足够的标准化、计量和专职检验人员 5）无损检测持证人员中具有：RT和UT高级持证人员，RT、UT、MT、PT等方法均具有中级持证人员。无损检测分包时，上述项目中可不包含RT、UT中级持证人员 6）持证焊工人数及项目应满足制造需要，一般不少于50人·项。	1）半自动或自动切割机切割厚度应能满足A级锅炉产品制造的需要 2）具有与制造产品相适应的焊接设备，包括自动埋弧焊机、气体保护焊机，手弧焊机等 3）必须具有以下三类重大设备中的两类，若只有其中一类设备的企业只可申请A级锅炉部件制造许可证 ①锅筒制造设备 a）水压机或油压机（能力应不低于1 000 t）； b）卷板机（卷板能力一般不小于46 mm厚）； c）锅筒热处理设备 ②膜式水冷壁制造设备（包括焊接、平整、成排弯曲设备） ③蛇形管制造设备和过热器、再热器集箱热处理设备	1）具有能满足A级锅炉产品制造需要的金相检验设备 2）具有长、热、力、电检测标准计量设备或固定的量值溯源 3）具有力学性能试验设备、冲击试样的加工设备和检测仪器或有保证质量能力的分包关系 4）由本企业进行无损检测时，应具有完好的与产品相适应的无损检测设备（包括测厚、射线、超声波、磁粉、渗透等设备）
B级	1）应具有足够的能将图纸转化为实际制造工艺的能力 2）应配备有足够的专职检验技术人员 3）无损检测持证人员中RT中级人员应不少于2人·项，UT中级人员应不少于2人·项。若无损检测分包时，RT、UT中级人员应至少各有1人·项 4）持证焊工人数及项目应满足制造需要，一般不少于30人·项	1）具有与制造产品相适应的冲压设备或有保证质量能力的分包关系 2）具有与制造产品相适应的卷板机（卷板能力一般为20～30 mm厚） 3）主车间的最大起吊能力应能满足实际制造产品的需要，一般应不小于20 t 4）具有足够的与产品相适应的焊接设备，包括自动埋弧机、气体保护焊、手弧焊机等 5）具有力学性能试验设备、冲击试样的加工设备和检测仪器或有保证质量能力的分包关系 6）具有符合要求的弯管放样和检测平台 7）由本企业进行无损检测时，应具有完好的与产品相适应的射线无损检测设备（其中周向曝光机不少于1台）和1台超声波无损检测设备	
C级	1）应配备有足够的专职检验技术人员 2）无损检测持证人员中应不少于2名RT中级人员。若无损检测分包时，RT中级人员至少有1名 3）持证焊工人数及项目应满足制造需要，一般不少于20人·项	1）具有与制造产品相适应的冲压设备或有保证质量能力的分包关系 2）具有与制造产品相适应的卷板机（卷板能力一般为12～20 mm厚） 3）主车间的最大起吊能力应能满足实际制造产品的需要，一般应不小于10 t 4）具有足够的与产品相适应的焊接设备，包括自动埋弧机、手弧焊机等 5）由本企业进行无损检测时，应至少有1台完好的与产品相适应的射线无损检测设备	
D级	1）无损检测持证人员中至少有1名RT中级人员 2）持证焊工人数及项目应满足制造需要，一般不少于10人·项	1）具有与制造产品相适应的切割、焊接、钻孔、弯管、卷板及机加工设备 2）具有与制造产品相适应的成形机械加工设备 3）主车间的最大起吊能力应能满足实际制造产品的需要，一般应不小于5 t 4）由本企业进行无损检测时，应至少有1台完好的与产品相适应的射线无损检测设备	

（2）压力容器制造许可资源条件

1）基本条件

① 人员要求

a）压力容器质保体系人员　压力容器制造企业具有与所制造压力容器产品相适应的、具备相关专业知识和一定资历的下列质量控制系统（以下简称：质控系统）责任人员：

设计、工艺质控系统责任人员。

材料质控系统责任人员。

焊接质控系统责任人员。

理化质控系统责任人员。

热处理质控系统责任人员。

无损检测质控系统责任人员。



压力试验质控系统责任人员。

最终检验质控系统责任人员。

b）技术人员 压力容器制造企业应具备适应压力容器制造和管理需要的专业技术人员。各级别压力容器制造许可证的技术人员应满足下列要求：

A1级、A2级、C级和B1级许可证企业技术人员比例不少于本企业职工数的10%，且具有与所制造压力容器产品相关的专业技术人员；

A3级、A4级、A5级、B2级和D3级许可证企业技术人员比例不少于本企业职工数的5%，且不少于5人；具有与所制造压力容器产品相关的专业技术人员。

c）专业作业人员 各级别压力容器制造许可企业中，制造焊接压力容器的企业，应具有满足制造需要的，且具备相应资格条件的持证焊工：

A2级、A3级和C级许可企业，具有不少于10名持证焊工，且具备至少4项合格项目；

A1级、A5级、B2级、B3级许可企业，具有不少于8名持证焊工、且应具备至少3项合格项目（非焊接容器除外）；

D级许可企业，具有不少于6名持证焊工，且具备至少2项合格项目。

各级别压力容器制造许可企业，应具有满足压力容器制造要求的组装人员。各级别压力容器制造许可企业，委托外企业进行压力容器无损检测的，应按照许可级别，配备相应的高、中级无损检测责任人员；由本企业负责压力容器无损检测的，应具备相应的无损检测作业人员，并应满足以下要求：

A1级许可企业，至少应具有RT（或UT、MT、PT）高级无损检测责任人员1人；

C级许可企业，至少应具有RT（或UT）高级无损检测责任人员1人，有RT和UT中级人员各2人·项；

A2级、A3级许可企业，至少应具有RT和UT中级人员各3人·项，无损检测责任人员应具有中级资格证书；

A5、B2级和D级许可企业，至少应具有RT和UT中级人员各2人·项，无损检测责任人员应具有中级资格证书；

B1级许可企业，至少应具有UT或MT中级人员各2人·项，无损检测责任人员应具有中级资格证书；

B3级许可企业需要进行无损检测的，应分别符合B1或B2级许可企业无损检测人员数量和级别的要求。

② 场地要求 各级别压力容器制造许可企业，应具备适应压力容器制造需要的制造场地、加工设备、成形设备、切割设备、焊接设备、起重设备和必要的工装，并满足以下要求：

具有存放压力容器材料的库房和专用场地，并应有有效的防护措施，合格区与不合格区应有明显的标志；

具有满足焊接材料存放要求的专用库房和烘干、保温设备；

具有与所制造产品相适应的足够面积的射线曝光室和焊接试验室。

2）专项条件 见表8.1-9。

表8.1-9 压力容器制造许可专项条件

A级	1）A1级许可企业中制造超高压容器的企业，应具有满足超高压容器需要的机加工设备和检测设备，应具有中、高级机加工人员至少2人。制造高压容器的企业，应有满足要求的热处理设备 2）A2级许可企业应具备额定能力不小于30 mm的卷板机和起重能力不小于20 t的吊车。深冷（绝热）容器制造企业，应具备填料烘干、充填、抽真空设备和检漏仪器 3）A3级许可企业中制造球壳板的企业，应具备能力不小于1 200 t的压力机和经验丰富的球壳板制造专业操作人员 4）A4级许可企业中，制造纤维缠绕容器的，应具备自控缠绕机械 5）A5级许可企业，应具有中级（或以上）持证电工至少2人和电气检测设备
B级	1）B级许可企业，应具有满足气瓶爆破试验要求的专用场地和爆破试验自动记录设备 2）B1级许可企业，应具备气瓶连续制造流水线，制造调质钢气瓶的，应具备UT或MT无损检测设备仪，淬火、回火的热处理设施及外测法水压试验设备 3）B2级许可企业，应具备气瓶制造线。其中乙炔瓶应具备配料、搅拌、振动、烘干和蒸压釜等设备；液化石油气瓶应具备连续制造流水线和热处理及其自动记录装置 4）B3级许可企业，应具备专用制造设备和制造线；制造缠绕气瓶的应具有自控缠绕机械和固化设备 5）满足制造专门产品需要的其他专用设备
C级	1）C1级许可企业，应具备铁路专用线 2）C2级和C3级许可企业，应具备相应的组装能力和试验设施

4.1.3 质量管理体系的基本要求

（1）管理职责

锅炉压力容器制造企业应有质量方针和质量目标的书面文件。应采取必要的措施使各级人员能够理解质量方针，并贯彻执行，应符合以下要求。

1）企业内与质量有关的活动，职责、职权和相互关系应清晰，各项活动之间的接口具有控制和协调措施。

2）从事与质量活动有关的管理、执行和验证工作的人员，特别是具有独立行使权力开展工作的人员，应规定其职责、权限和相互关系，并形成文件（包括材料、焊接、无损检测等负责人的责任）。工厂管理层中应指定一名成员为质量保证工程师并明确其对质保体系的建立、实施、保持和改进的管理职责和权限。

（2）质量体系

企业应建立符合锅炉压力容器设计、制造，而且包含了质量管理基本要素的质量体系文件。

1）作为确保产品符合要求的一种手段，应编制质保手册。质保手册应包括或引用质量体系程序，并概述。

2）质量体系文件的结构。编制符合实际要求且与规定的质量方针相一致的程序文件，具有有效实施质量体系及其形成文件的程序。

3）质保手册中规定的表格应该标准化、文件化。现行的质量记录表格的内容应能满足相应级别锅炉压力容器产品的质量控制要求。

4）应有正在贯彻实施的并能确保产品质量的质量计划。质量计划中产品质量控制点（包括记录审核点、见证点和停止点）应合理设置。

（3）文件和资料控制

企业应制订文件和资料的控制规定，应包括以下内容。

1）应制订文件管理的规定：

明确受控文件类型；文件的编制、会签、发放、修改、回收；保管等。



2）应有确保有关部门使用最新版本的受控文件的规定。

3）适当范围的外来文件，如标准和顾客提供的图样。

（4）设计控制

1）设计部门各级人员的职责应该有明确的规定。

2）应有与锅炉压力容器制造有关的规程、规定和标准。

3）锅炉压力容器的设计文件应规定企业所制造的锅炉压力容器产品满足锅炉压力容器产品安全质量要求。

4）应有关于新标准的收集和贯彻的规定。

5）应制订对设计过程进行控制的规定（包括设计输入、输出、评审、更改、验证等环节）。

（5）采购与材料控制应包括以下内容

1）采购控制　有对供方进行有效质量控制的规定。

当供方有质量问题时，企业具有处理方式的规定。

分包的锅炉压力容器承压部件应由取得中国政府或授权机构认可的制造企业制造，企业应对分包的锅炉压力容器受压部件的质量进行有效控制。

应制订采购文件的控制程序。

应制订原材料及外购件（指板材、管材等承压材料）的验收与控制的规定，以防止用错材料。

2）材料的管理和发放　应制订原材料及外购件保管的规定，包括关于存放、标识、分类等要有明确的规定。

应制订原材料库房存放措施的规定；应制订关于材料发放的管理规定，包括材料的领用、代用等。

应制订材料标记移植管理规定，包括加工工序中的材料标识移植和余料处理等。

（6）工艺控制

1）应制订工艺文件管理的规定、包括工艺文件的编制、发放、更改、审批等应有明确的规定。

2）应制订与锅炉压力容器产品相适应的工艺流程图或产品工序过程卡、工艺卡（或作业指导书）。

3）应有主要受压部件的工艺流程卡和指导作业人员的工艺文件（作业指导书）的规定。

（7）焊接控制

1）焊材管理　应有焊材的订购、接收、检验、储存、烘干、发放、使用和回收的管理规定，并能有效实施。

2）焊接管理　应有焊工培训、考核和焊工焊接档案管理的规定。

应制订适应锅炉压力容器产品需要的焊接工艺评定（PQR）、焊接工艺指导书（WPS）或焊接工艺卡，并应满足中国有关技术规范的要求。应有验证焊接工艺评定（PQR）的管理规定和焊接工艺指导书（WPS隐）分发、使用、修改的程序和规定。

应制订确保合格焊工从事受压元件焊接工作的措施，并制订焊工资格评定及其记录（WPQ）的管理办法，同时规定产品焊缝的焊工识别方法，并能有效实施。

（8）热处理控制

1）应制订热处理工艺文件的管理规定，包括对热处理工艺文件的编制、审批、使用、分发、记录、保存等。

2）应制订热处理的质量控制管理规定。

3）热处理分包时，应有分包管理规定，至少应包括对分包方评价规定和对分包项目质量控制的规定。

（9）无损检测控制

1）应制订无损检测质量控制规定，包括对检测方法的确定、标准规范的选用、工艺的编制批准、操作环节的控制、报告的审核签发和底片档案的管理等。

2）应编有无损检测的工艺和记录卡，并且能满足所制造产品的要求。

3）应制订无损检测人员资格管理的规定。

4）无损检测分包时，应有分包管理规定，至少应包括对分包方评价规定和对分包项目质量控制的规定。

（10）理化检验

1）应制订理化检验的管理规定。

2）应有对理化检验结果的确认和重复试验的规定。

3）理化检验分包时，应有分包管理规定，至少应包括对分包方评价规定和对分包项目质量控制的规定。

（11）压力试验控制

1）应编制压力试验工艺和相关程序要求。

2）应制订对压力试验进行质量控制的规定，包括压力试验的监督、确认，压力试验过程的安全防护、压力试验介质和环境温度等。

（12）其他检验控制

1）应制订检验管理的规定，其内容应包括：检验管理人员的权责、进货检验、过程检验、最终检验、检验报告的存档和质量证明书管理等。

2）应制订检验和试验计划，并能有效实施。

3）应制订关于检验和试验状态标识的规定。

（13）计量与设备控制

1）制订计量管理规定，保证仪器、仪表、工具等在计量有效期内使用。

2）有对计量器具和试验仪器进行有效的控制、校准和维护的规定。

（14）不合格品的控制

1）应制订对不合格品进行有效控制的规定，以防止不合格品的非预期使用或安装。

2）应有对不合格品的标识、记录、评价、隔离（可行时）和处置等进行控制的规定。

对不合格报告的编制、签发、存档等应有规定。

对不合格品的处理环节（回用、返修、报废等）应有相关的规定。

对返修后进行重新检验的规定。

（15）质量改进

1）应有对产品的质量信息（包括厂内和厂外）进行反馈、汇集分析、处理的流程。

2）应有进行内部质量审核的规定，以确保质量保证体系正常运作并能对存在的质量问题进行分析研究，提出解决问题的措施和预防措施。

3）应有内部质量审核的规定。审核活动应由与审核无直接责任的人员进行。

应制订质量审核意见的接受、处理和回复的程序，以及纠正或改进措施。

具有对监检企业（或第三方检验企业）及客户发现并提出的产品质量问题进行及时解决的规定。

（16）人员培训

应制订质保工程师、焊接工程师、检验人员、理化和无损检测人员、焊工和其他对产品质量有重要影响的制造活动执行者、验证者和管理人员等培训的规定。

4.2　德国标准 DIN6700《轨道车辆及其部件的焊接——第 2 部分：部件分级、焊接企业的认证、一致性的评定》简介

在德国及某些欧洲国家，从事轨道车辆及其部件的焊接制造和焊接修理的企业必须取得相应级别的生产许可。没有这种许可，企业的产品被认为是不符合标准的或不规范的。根据 DIN6700 标准，这类企业分 5 个级别，即 C1 ~ C5，其产品的安全性要求逐渐减弱，不同的级别所涵盖的部件类型也不同，见表 8.1-10。



表 8.1-10　部件的分级分类

部件级别	说　　明	部　件　类　型
C1①	安全性要求较高的轨道车辆及其部件	轨道车辆及其部件的生产、改造和修理 部件举例： ⇒转向架（顶梁、纵梁、横梁、框架） ⇒底盘（外伸梁、纵梁、横梁、总装） ⇒车身（前壁、侧壁、顶）
C2	安全性要求较高的轨道车辆构件	轨道车辆结构件的生产，例如： ⇒牵引和接头装置 ⇒上车门、前壁门 ⇒自行装载的仪表箱和卧式容器（清洁水箱和污水箱） ⇒外部设施的支架（如：油箱、电器、空调和压缩空气罐） ⇒外部机械装置（如：变压器、发动机和减速器的悬挂装置） ⇒车轮支架、轴承箱、弹簧托架、减振器、缓冲装置 ⇒车顶构件（集电器，内衬） ⇒机房设备（变压器油箱、变压器、发动机和减速器的悬挂装置，牵引电机附件，仪表支架） ⇒传力构件（牵引铰接头、万向节） ⇒刹车装置（磁力制动器、拉杆、制动三角、制动缸、制动横梁） ⇒活动平台（如汽车运输机） ⇒旋转和翻转装置 ⇒立式止动环 ⇒重载车辆支架，包括双轨车 ⇒加压环 ⇒轨道车辆燃油箱 焊接生产。 C1/C2 级的轨道车辆、部件、结构件的维修
C3	安全性要求中等的轨道车辆构件	不承压无特殊检测压力容器的生产，例如： ⇒非危险品容器 ⇒其他运输容器 轨道车辆构件的生产，例如： ⇒客车的内部结构件（包厢构件、内壁、门、内衬） ⇒内部设施的支架（电器、空调、空气压缩机） ⇒驾驶室设施 ⇒ WC 构件和水箱及附件 ⇒车辆内部可移动隔墙，包括其轨道 ⇒制动器管道支架 ⇒底盘下不可自行装载的仪表箱（没有支架） ⇒踏板，手柄（包括上车处的把手）和车外的栏杆 C3 级的轨道车辆构件的维修
C4	安全性要求有限的轨道车辆构件	轨道车辆的简单构件的生产，例如： ⇒用于各种操作的曲柄和手柄 ⇒挡板 ⇒仪表箱和开关柜（包括手动刹车仪表箱和控制台，无支架） ⇒护板支架 ⇒止车器 ⇒货车护板（槽车的保温板） ⇒轨道车辆上的踏板、手柄、栏杆。 轨道车辆的市购配件的新投产，例如： ⇒座椅底座 ⇒窗框 ⇒通风隔栅 C4 级的轨道车辆构件的维修



续表 8.1-10

部件级别	说　明	部　件　类　形
C5[2]	本部件级别适用于不进行独立焊接生产的企业，对属于 C1～C3 级的焊接部件和构件进行 －设计 －购买 －装配	

① 大型维修车间可以进行广泛的焊接生产（例如轨道车辆或部件的整体改造、调整，轨道车辆的大修）的焊接企业，归入 C1 级（须按本标准认证，由认证机构确认，由监督机构确定）。
② 其应用必须在合同双方之间取得一致，负责的监督机构必须监督。

（1）对焊接企业的要求

1）对焊接企业的焊接质量要求　焊接企业必须满足表 8.1-11 中的焊接质量要求

表 8.1-11　对焊接企业的焊接质量要求

部件级别	要求
C1～C3	根据 ISO 3834—3/DINEN729－3 的质量要求[1] －遵守 DINEN6700－2：2001 中 5.2～5.6 的要求
C4	根据 ISO 3834—4/DINEN729－4 的质量要求。 －遵守 DINEN6700－2：2001 中 5.2～5.6 的要求
C5	根据 ISO 3834—3/DINEN729－3 的质量要求。[1] －遵守 DINEN6700－2：2001 中 5.2.1～5.6 的要求

① 如果在订货时约定质量管理体系按 DINENISO9001 或 DINENISO9002 认证：DINEN729－2。

2）人员配置

① 焊接管理人员　按照资质，焊接管理的任务和责任见 ISO 14731/EN719，要成为焊接管理人员（SAP）应具备表 8.1-12 中的资质。作为焊接管理人员必须具有符合 ISO 14731/EN719 的资质或经验。

根据部件级别焊接企业必须按照表 8.1-13 配备焊接管理人员。焊接管理人员原则上必须属于本企业。

② 焊工、焊接操作工和装配工　焊接企业必须根据焊接方法、材料，按照标准 DINEN287－1、DINEN287－2 以及 DINENISO9606－3 配备合格的焊工和按照 DINEN1418 配备操作工和装配工。

考试合格的焊工及操作工和装配工的数量根据生产范围设置。每种焊接方法和材料大类至少需要两名焊工，每台焊接设备至少需要两名操作工、装配工。

表 8.1-12　焊接管理人员的资质

级别	资　质	学　历	适　用　范　围
1	根据 ISO 14731/DINEN719，具有丰富的技术知识，如： －EWE（欧洲焊接工程师）符合 EWF 准则[1]， －DVS－SFI（德国焊接工程师）符合 DVS1173， －DB－SFI（DB 焊接工程师）符合 DS046/208， －相当的资质	由高级技术学校（TH）、工业大学（TU）或应用技术大学（FH）毕业，获得 Dipl. 工程师学位，参加有资质的培训机构的附加培训班	所有级别部件的焊接管理责任人 SAP 和同等代理
2	根据 ISO 14731/DINEN719，具有专业技术知识，如： －EWT（欧洲焊接技术员）符合 EWF 准则[1]， －DVS－ST（德国焊接技术员）符合 DVS1172， －相当的资质	有资质的培训机构的技术员学历和培训	焊接管理责任人 SAP： －C3 或 C5 级部件；
3	根据 ISO 14731/DINEN719，具有丰富的技术知识，如： －EWS（欧洲焊接技师）符合 EWF 准则[1]， －DVS－SFM（德国焊接技师）符合 DVS1171， －DB－SM（DB 焊接技师）符合 DS046/208， －相当的资质	有资质的培训机构的培训	代理： －C3 级部件 －C1 和 C2 级部件（有条件的） （非同等）
4	焊工师傅，焊接车间工长，例如： －EWP 符合 EWF 准则[1]、 －焊接车间工长符合 DVS1157、 －DVS 焊工师傅， －DB 焊工师傅， －相当的资质		代理： －C3 级部件 －C1 和 C2 级部件（有条件的） （非同等）

① 人员资质的证明必须由一个根据 DINEN45013 委任的机构出具。

表 8.1-13　焊接企业的要求

部件级别	C1	C2	C3	C4	C5
应用范围（部件分类见表 8.1-10）	安全性要求较高的轨道车辆及其部件	安全性要求较高的轨道车辆构件	安全性要求中等的轨道车辆构件	安全性要求有限的轨道车辆构件	本部件级别只适用于不进行独立焊接生产的企业（见表 8.1-10）

续表 8.1-13

部件级别	C1	C2	C3	C4	C5
焊接企业的资质要求	从事焊接生产的证书；满足 5.2 ~ 5.6 的要求和 ISO 3834—3/DIN EN 729 - 3 或 ISO 3834 - 2/DIN EN 729 - 2（根据订货要求 QMS 符合 DIN EN ISO9001 或 DIN EN ISO9002）质量要求的证明			从事焊接生产的证书；满足 5.2 ~ 5.6 的要求和 ISO 3834 - 4/DIN EN 729 - 4 质量要求的证明	从事焊接生产的证书；满足 5.2.1 ~ 5.6 的要求和 ISO 3834 - 3/DIN EN 729 - 3 质量要求的证明
焊接管理人员资质按照表 8.1-12	- 焊接管理责任人 SAP： ·至少一名 ·资质：1 级 - 同等代理人： ·至少一名 ·资质：1 级[1] - 对每一焊接生产领域附加代理人： ·至少一名 ·资质： 3 或 4 级	- 焊接管理责任人： ·至少一名 ·资质：1 级 - 代理人： ·至少一名 ·资质： 2 或 3 级 - 对每一焊接生产领域附加代理人[2]： ·至少一名 ·资质： 3 或 4 级	- 焊接管理责任人 SAP： ·至少一名 ·资质： 2 或 3 级 - 代理人： ·至少一名 ·资质：4 级	没有要求	- 对 C1 类： 至少一名资质 1 级的 SAP[3] - 对 C2 类： 至少一名资质 2 级的 SAP[3] - 对 C3 类： 至少一名资质 2 级或 3 级的 SAP
焊工及操作员、装配工的资质和数量	焊工考核按 ISO 9606 - 1/DIN EN 287 - 1 和 ISO 9606—2/DIN EN 287 - 2 及 DIN EN 9606 - 3，焊接人员考核按 ISO 14732/DIN EN 1418。数量：每类焊接方法、每台设备、每类材料两人				取消
检验人员	在焊接生产中有从事质量检验和监督的合格的检验人员。从事非破坏性检验的人员必须符合 DIN EN 473 的要求。焊缝检验必须在企业的焊接管理责任人的负责下进行和评价				取消
焊接工艺文件（WPS）和 WPS 的评定	WPS 按照 ISO 9956 - 2/DIN EN 288 - 2；评定按照 ISO 9956 - 3/DIN EN 288 - 3 或 ISO 9956 - 4/DIN EN 288 - 4，材料类型为 1.1、1.2、8、9、21 ~ 26 的手工焊或半自动焊根据 DIN EN 6700 - 6 评定，也可以按照 ISO 9956 - 6/DIN EN 288 - 6 或 ISO 9956 - 8/DIN EN 288 - 8			如果订货时要求：WPS 按照 ISO 9956 - 2/DINEN288 - 2；评定按照 ISO 9956 - 6/DINEN288 - 6 或 ISO 9956 - 8/DINEN288 - 8	取消

① 对小型焊接企业不要求（焊接生产很少的企业，只有一种焊接方法；确定按照本标准认证，有认证机构认可，在责任监督机构的监督之下。）

② 仅在有多个焊接生产领域时要求。

③ 对于仅从事设计的企业，DVS 焊接设计师可作为 SAP 认证。

③ 检验人员　焊接企业必须有足够称职的检验人员。

在焊接生产中进行质量检验的检验人员必须经企业中的焊接管理责任人培训。

如果生产上有要求，无损检测人员要符合 ISO 9712/DIN EN 473。检测人员必须具有相应的检验方法（VT，PT，MT，ET，UT，RT）中的一种的符合 DIN EN473 至少 I 级资质。作为检验监督则要求符合 ISO 9712/DIN EN 473 的 II 级资质。检验可以在不属于企业的检验机构进行。检验人员必须满足上述要求，检验机构必须满足 EN 45001 的要求。

3）技术装备　基本要求如下。

焊接企业必须具备与生产范围相适应的、满足以下要求的技术装备。

① 有屋顶的、干燥的、有充足照明的车间和工位。

② 干燥的焊接材料仓库。

③ 电焊机、焊接设备和设施满足焊接生产的需要。

④ 用于工件材料焊前准备及焊后热处理所需的装置、加工设备和工具。不同的材料（如铝，不锈钢）需要不同的工具、加工设备和装置，焊接前它们必须经过净化。

⑤ 充足的能源供应。

⑥ 焊接用气体的供应装置和设施。

⑦ 焊条和焊剂的干燥设施。

⑧ 与所焊部件配套的焊接工装。

⑨ 用于焊缝的破坏性检验和非破坏性检验的检验设备、材料。如果没有，则必须与其他检验机构签订检验合同（该机构必须满足 DIN EN 45001 的要求）。

附加要求如下。

C1 和 C2 级部件的焊接，还要具备以下技术装备。

① 用于运输和转动部件的起重设备。

② 吊盘。

③ 焊接工作台，以保证平焊位置。

④ 焊接组件（如：底板、侧壁、前墙和顶板、底盘、转向架、容器、底座）的夹具。

⑤ 装配夹具。

⑥ 预热和焊后热处理设备，如果所焊材料及部件需要。

⑦ 清理焊缝的工具、设施（如打磨机、喷丸装置、不锈钢的酸洗设备）。

⑧ 铝件焊接的专用厂房，保证隔绝对铝的耐腐蚀性和焊接质量有影响的灰尘、气体、蒸汽等）。

4）焊接工艺文件　C1 ~ C3 级部件的焊接需要有符合 ISO 9956 - 2/DIN EN288 - 2 的焊接工艺文件。

C4 级部件只有当订货时有要求才需要焊接工艺文件。

焊接工艺文件（WPS）评定要求如下。

根据焊接方法和工件材料的类型，评定通过以下检验获得。

手工和半自动焊接，材料为 1.1，1.2，8，9，21 ~ 26，按照 DIN 6700 - 6、ISO 9956 - 3/DIN EN 288 - 3 及 ISO 9956 - 4/DIN EN288 - 4 或在认证机构的许可下，按照 ISO 9956 - 6/DIN EN288 - 6 或 ISO 9956 - 8/DIN EN288 - 8。

对轨道车辆的维修，焊接试样的评定必须按照 ISO 9956 - 8/DIN EN288 - 8 直接在生产开始前完成。



对全自动焊接，材料为 1.3－7 和 31－37，根据 DIN EN 6700－6：符合 ISO 9956－3/DIN EN288－3 及 ISO 9956－4/DIN EN288－4。

（2）焊接企业的认证

根据本标准焊接企业必须填写相应的表格以提供焊接领域的详细说明，企业说明必须由认证机构按本标准的要求进行检查。

从人员资格、焊接工艺文件、技术装备与现场生产状况，逐一审查，最后审核认证人员还必须与企业内的焊接管理人员进行专业谈话，从焊接工艺、焊接材料、焊接结构到焊接生产四个方面衡量焊接管理人员是否具备相应的知识和经验，是否了解相应的标准以及是否有能力对焊接的相应过程进行必要的控制和管理。

证书最长有效期为三年。有效期结束后，焊接企业可以在考核后由认证机构延长证书有效期。证书样本见表 8.1-14。

表 8.1-14　DIN 6700－2 证书样本

证　　书

用于轨道车辆及其部件的焊接

根据 DIN 6700－2

企业＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

为其在＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

证明，该企业能够从事 C1/C2/C3/C4/C5[①] 级部件的焊接。

应用范围符合表 8.1-10：＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

C.1 有效范围

焊接方法 根据 DIN EN 6700－6	材料类型 根据 DIN EN 6700－6	其他材料	规格	备注

焊接管理责任人：＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

同等代理人：＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

其他代理人：＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

证明编号：＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

有效期：＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

签发日期：＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

签字

① 保留可能项。

4.3　德国标准 DIN18800－7 钢结构——生产实施和焊接企业资格认证（2002.9）

4.3.1　企业级别的划分

在德国及大多数欧洲国家，进行钢结构生产的企业，根据 DIN 18800－7 要求应取得相应的企业资格认证，否则该企业的产品将不被用户接受。

在车间或现场从事钢结构的焊接工作（包括焊接修复）的企业必须拥有相应的企业资格。根据企业产品所选用的材料结构形式和承载等情况，企业资格认证分为五个级别，即 A、B、C、D、E，见表 8.1-15。

没有经过资格认证的企业所生产的焊接结构件被认为是不规范的。各级的钢结构企业有关材料、厚度、焊接工艺、构件承载情况的适用范围及相关要求见表 8.1-16～表 88.1-20。

表 8.1-15　钢结构焊接企业资格证书

1	级　别	A	B	C	D	E
2	资格证书	不要求小企业资格证书	小企业资格证书	小企业资格证书附加扩展	大企业资格证书	大企业资格证书附加扩展至动载领域
3	作用种类	主静载构架结构				非主静载构架结构
4	适用范围	表 8.1-16	表 8.1-17	表 8.1-18	表 8.1-19	表 8.1-20



续表 8.1-15

5	企业自身的生产检查	制造商本身负责实施				
6	对企业的要求	无	要求认证机构颁发的焊接企业资格证书			
7	根据 ISO 3834/EN729 要求的级别	基本质量要求 ISO 3834－4/EN729－4	标准质量要求 ISO3834－3/EN729－3			全面质量要求 ISO 3834－2/EN729－2
8	根据 ISO 14731/EN719 焊接管理人员技术知识的级别	无特殊要求⑥	技术基本知识 DVS－EWF1171③	专项技术知识 DVS－EWF1172①,④	全面技术知识 DVS－EWF1173②,⑤	全面技术知识 DVS－EWF1173⑤

① 技术基础知识和经验在系列产品制造中就足够了；
② 技术知识和经验在系列产品制造中就足够了；
③ DVS－EWF1171 规范：European Welding Specialist（欧洲焊接技师）；
④ DVS－EWF1172 规范：European Welding Technologist（欧洲焊接技术员）；
⑤ DVS－EWF1173 规范：European Welding Engineer（欧洲焊接工程师）；
⑥ 要求经 ISO 9606－1/EN287－1 标准考试合格的焊工。

表 8.1-16 A 级

适 用 范 围	要 求
· 材料：强度级别至 S275 的非合金结构钢 · 产品厚度≤16 mm，焊接的顶部和底部的翼缘板≤30 mm · 焊接工艺：手工和半自动方法 · 带有简单的和从属焊缝的构件（主静载），如： —用无接头和拘束的轧制型材所制的带有上下翼缘板的支座 —建筑物中至 5 m 长的扶梯（传送带方向） —栏杆顶部水平方向承载≤0.5 kN/m 的围栏（见 DIN 1055—3）	· 要求须按 ISO 9606－1/EN287－1 标准考试合格的焊工，焊工的工作范围必须与焊工考试的适用范围相符 · 按 ISO 3834－4/EN729－4 基本质量要求

表 8.1-17 B 级

适 用 范 围	要 求
· 材料：强度级别至 S275 的非合金结构钢 · 产品厚度≤22 mm 焊接的端板，上下翼板≤30 mm · 焊接工艺：手工和半自动方法 · 所有等级 A 的构件和主静载的 —20 m 跨度以内的实腹梁、衍梁和密闭的围栏式框架结构的支架 —20 m 高以内的桅杆和支撑结构 —根据 DIN4133 尺寸范围为 Ⅱ 的钢制烟囱 —板厚≤8 mm 的容器和储仓 —交变载荷≤5 kN/m² 的扶梯、人行桥、平台（见 DIN1055－3） —栏杆顶部水平方向承载＞0.5 kN/m 的围栏 —DIN4420 和 DIN4421 中提到的脚手架 —其他类似种类和尺寸的构件	· 焊工要经过 ISO9606/EN287－1 有效的考试并合格。考试的适用范围必须全部覆盖这一焊工的工作范围。焊接支管的焊工要附加 DIN18808 中所规定的考试项目 · 企业中至少具有一名属于本企业的焊接管理人员，并具有 DVS－EWF1171所规定的技术基础知识 · 按 ISO3834－3/EN729－3 标准质量要求

表 8.1-18 C 级

适 用 范 围	要 求
· 材料同 B 级中规定，还有不锈耐蚀钢① 和强度级别在 S275 以内的铸钢，承受纯压应力时，强度级别至少 S355 及以内 · 产品在承载截面厚度≤30 mm，焊接的端板，上下翼板的厚度≤40 mm · 焊接工艺：手工、半自动、全机械和自动焊接方法（也包括 ISO 14555 中规定的螺栓焊） · 所有 B 级构件并扩展至跨距和高度至 30 mm，以及接收槽和所有本标准中应用的铸钢件	· 焊工要经过 ISO 9606－1/EN287－1，焊接操作工要经过 ISO 14732/EN1418 考试并合格。考试的适用范围要完全覆盖焊工/焊接操作工的工作范围。从事支管焊缝焊接的焊工要附加 DIN 18808 中规定的考试项目 · 企业中至少具有一名属于本企业的焊接管理人员，并且具有 DVS－EWF1172 所规定的专项技术知识 · 在系列产品中制造② 和铸钢件焊接中需要焊接管理人员有足够的经验，具有 DVS－EWF1171 中所规定的技术基础知识的焊接管理人员能够承担此任 · 按 ISO 3834－3/EN729－3 标准质量要求

① 只适用于钢制烟囱，其他种类的构件一般要有建筑监督的许可。
② 系列产品制造是指重复性生产类似的构件，且这些构件具有类似的结构形式、钢种、焊接工艺和焊缝形式。



表 8.1-19　D 级

适用范围	要求
主静载 · 本标准所规定的材料都可应用 · 材料厚度根据行业标准中的具体规定 · 焊接工艺：手工、半自动、全机械和自动焊接方法 · 所有主静载荷的构件，其结构符合钢结构基础标准和钢结构专业标准的规定	· 焊工要经过 ISO 9606 - 1/EN287 - 1，焊接操作工要经过 ISO 14732/EN1418 考试并合格。考试的适用范围要完全覆盖焊工/焊接操作工的工作范围。从事支管焊缝焊接的焊工要附加 DIN 18808 中规定的考试项目 · 企业中至少具有一名属于本企业的焊接管理人员，并且具有 DVS - EWF - 1173 所规定的专项技术知识 · 在系列产品中制造① 和铸钢件焊接中需要焊接管理人员有足够的经验，具有 DVS - EWF1172 中所规定的技术基础知识的焊接管理人员能够承担此任 · 按 ISO 3834 - 3/EN729 - 3 标准质量要求

① 系列产品制造是指重复性生产类似的构件，且这些构件具有类似的结构形式、钢种、焊接工艺和焊缝形式。

表 8.1-20　E 级

适用范围	要求
· 本标准中所有规定的材料都可使用 · 产品厚度根据行业标准中的具体规定 · 焊接工艺：手工、半自动、全机械和自动焊接方法（也包括 DIN EN、ISO 14555 中规定的螺栓焊） · D 级的所有构件和下列技术规范中非主静载的构件： —DS804　铁路桥梁 —DIN18809　公路桥梁 —DIN4131　有工作强度证明要求的无线支架 —DIN4132　起重机轨道和钢支架 —DIN4133　尺寸范围Ⅰ的钢制烟囱 —DIN4112　有工作强度证明要求的悬空建筑物及其他类似的承受动载荷的构件	· 焊工要经过 ISO 9606 - 1/EN287 - 1，焊接操作工要经过 ISO 14732/EN1418 考试并合格。考试的适用范围要完全覆盖焊工/焊接操作工的工作范围。从事支管焊缝焊接的焊工要附加 DIN18808 中规定的考试项目 · 企业中至少具有一名属于本企业的焊接管理人员，并且具有 DVS - EWF1173 所规定的专项技术知识 · 按 ISO 3834 - 2/EN729 - 2 全面质量要求

4.3.2　企业认证时对企业的要求

（1）人员资质要求

1）焊接管理人员　有资格作为焊接管理人员的有焊接工程师、焊接技术员和焊接技师，其资质要满足行业中的有关规定。

2）检验监督人员　其资质要求如下。

DVS - EWF1178Ⅲ级（焊接质检技师）；

DVS - EWF1178Ⅱ级（焊接质检技术员）；

DVS - EWF1178Ⅰ级（焊接质检工程师）。

3）焊工、焊接操作工　其资质要求分别为 ISO 9606/EN287 和 ISO 14732/EN1418。

4）无损检测人员　其资质要求为 ISO 9712/EN473 相应级别。

（2）焊接工艺文件要求

预备焊接工艺规程（pWPS）和焊接工艺规程（WPS）必须满足 ISO 9956 - 2/EN288 - 2 的要求，预备焊接工艺规程的认可和评定见表 8.1-21。

生产非主静载的结构时，要求企业制定焊接计划。

（3）材质要求

母材及焊材的材质证书必须至少满足 EN10204 的要求。

（4）证书有效期

企业一旦经认证机构验收取得相应级别的资格证书，就应在证书所标明的有效期工作范围内工作，证书有效期最多为 3 年。3 年后经复审可再延期 3 年，但钢结构行业规范中一般规定，企业自取得相应级别资格证书后，每年要接受一次认证机构的年审。

表 8.1-21　预备焊接工艺规程的认可方法

材料	焊接机械化程度	认可方法
强度级别在 $\sigma_e \leqslant 355\ \mathrm{N/mm^2}$ 及以内的轧制和铸钢材料	手工和半自动	ISO9956 - 3/EN288 - 3 ISO 9956 - 5/EN288 - 5 ISO 9956 - 6/EN288 - 6 ISO 9956 - 7/EN288 - 7 ISO 9956 - 8/EN288 - 8
	全机械和全自动	ISO 9956 - 3/EN288 - 3 ISO 9956 - 8/EN288 - 8
强度级别在 $\sigma_e > 355\ \mathrm{N/mm^2}$ 及以内的轧制和不锈钢材料	所有	按 DVS1702 中的补充规定

编写：邓义刚（机械工业哈尔滨焊接技术培训中心）
解应龙（机械工业哈尔滨焊接技术培训中心）



第2章　焊接结构的无损检测方法

1　概述

焊接结构的无损检测是在不破坏焊接结构的前提下，实现对其内外部质量进行评价和控制的综合性应用技术，是保证焊接产品质量的有效方法。目前除了（X、γ）射线照相、超声波、磁粉、渗透和涡流探伤等传统无损检测方法以外，近年来随着科学技术的不断发展，又有声发射、工业 CT、金属磁记忆、红外热成像等新方法和新技术用于焊接结构的无损检测，且随着计算机技术的广泛应用，无损检测技术也正向数字化、程序化和规范化的方向发展。

在传统无损检测方法中，（X、γ）射线照相和超声波探伤适合于焊缝内部缺陷的检测，磁粉、渗透和涡流探伤则适用于焊缝表面质量的检测。每一种无损检测方法都有其优点和局限性，因此应根据焊缝的材质与结构形状来选择合适的检测方法。各种无损检测方法符号见表 8.2-1，常规无损检测方法的对比见表 8.2-2 和表 8.2-3，焊缝无损检测新技术的对比见表 8.2-4，其适用性见表 8.2-5，对铝合金疲劳裂纹的检出率见图 8.2-1～图 8.2-4。

表 8.2-1　焊缝无损检测方法符号

无损检测方法	射线照相	超声波探伤	磁粉探伤	渗透探伤	涡流探伤	声发射	工业 CT	金属磁记忆	红外热成像
符号	RT	UT	MT	PT	ET	AE	ICT	MMT	TNDT

表 8.2-2　焊缝（X、γ）射线照相与超声波探伤的对比

检测方法	X 射线照相	γ 射线照相	超声波探伤
设备	射线源、电源、暗盒、胶片、胶片处理设备、观片灯、射线剂量装置等	γ 源、暗盒、胶片、胶片处理设备、观片灯、辐射监控设备等	超声波探伤仪、探头、耦合剂、试块等
原理	利用阴极灯丝产生的电子高速轰击靶所产生的电磁波穿透工件，完好部位与缺陷部位透过剂量有差异，从而在底片上形成缺陷影像	利用放射性物质在衰变过程中产生的电磁波穿透工件，完好部位与缺陷部位透过剂量有差异，从而在底片上形成缺陷影像	利用弹性波遇到与声波相垂直的缺陷会形成反射或衍射的方法提取缺陷信号，并显示在示波屏上
优点	可得到直观长久的影像记录，功率可调，照相质量比 γ 射线高	工作效率高，可定位于管道或容器内部一次像，可得到直观长久的影像记录	对面状缺陷敏感，穿透力强，不受厚度限制，易携带，对操作人员无损害 焊缝只需单面靠近，检测时间短，成本低
局限性	一次投入大，不易携带，需要电源，对检测人员素质要求高 无法测量缺陷的深度，焊缝需双面靠近，不易发现裂纹和未熔合缺陷	放射性危险大，射线源要定期更换，能量不可调节，成本高，对检测人员素质要求高 无法测量缺陷的深度，焊缝须双面靠近	对被检工件表面状态要求高，不易测出细小裂纹，对检测人员素质要求高，不适用于形状复杂和表面粗糙的工件 厚度小于 8 mm 时，要求特殊检验方法 奥氏体粗晶焊缝检测困难
适用对象	适用于检出夹渣、气孔、未焊透等体积型缺陷。对与射线方向相一致的面积型缺陷有较高检出率	最适用于检出厚壁体积型缺陷	有利于检出裂纹类面积型缺陷

表 8.2-3　焊缝磁粉探伤、渗透探伤及涡流探伤的对比

检测方法	磁粉探伤	渗透探伤	涡流探伤
设备	磁粉探伤机、电源、磁粉、试片（块）等 荧光磁粉探伤则需紫外线灯	荧光或着色渗透剂、显像剂、清洗剂及清洗装置、标准试块等 荧光渗透探伤则需紫外线灯	涡流探伤仪、标准对比试块
原理	经磁化的焊缝利用缺陷部位的漏磁通可吸附磁粉的现象能形成缺陷痕迹	利用毛细作用将带有颜色的渗透液喷涂在焊缝表面上，使其渗入缺陷内，清洗后施加显像剂显示缺陷彩色痕迹	利用探头线圈内流动的高频电流可在焊缝表面感应出涡流的效应，通过测出缺陷改变涡流磁场所引起的线圈输出（如电压或相位）变化来反映缺陷



续表 8.3-3

检测方法	磁粉探伤	渗透探伤	涡流探伤
优点	经济简便，快速直观，缺陷性质容易辨认 油漆与电镀面基本不影响检验灵敏度，但应做灵敏度的试验	适于各种金属和非金属材料，设备轻便，投入小，操作简便，缺陷性质容易辨认	经济简便，不需耦合，检测速度快，可自动对准工件探伤，探头不接触工件，可用于高温检测
局限性	不适用于非铁磁性材料，难以确定缺陷深度，某些要求探伤后退磁	不适用于疏松多孔性材料，对环境温度要求高，探伤前后必须清洁焊缝表面，难以确定缺陷的深度	不适用于非导电材料，穿透能力弱，检验参数控制相对困难，缺陷种类难判断
适用对象	可检表面与近表面缺陷	可检表面开口缺陷	可检验各种导电材料焊缝与堆焊层表面与近表面缺陷

表 8.2-4　其他焊缝无损检测技术的对比

检测方法	声发射	工业 CT	金属磁记忆	红外热成像
设备	声发射换能器、放大和信号处理电路及信号分析系统等	工业 CT 机（射线源、机械扫描系统、探测系统、计算机系统等）	磁记忆探伤诊断仪	热源、红外探测器、热像仪、图像采集处理系统等
原理	利用材料在塑性变形和断裂时会以弹性波形式释放应变能的现象，通过换能器来接收声信号，并分析声信号以确定声发射源	通过接收 X 射线投影，并根据所得横断面的一组数据，经过计算机系统的处理，来获得焊缝横断面的图像	由于焊接缺陷会导致磁畴异常，并以漏磁场的形式延伸至焊缝表面，通过检测焊缝表面的磁场分布就可进行缺陷检测	利用缺陷区和完好区的热扩散系数不同的原理，通过注入恒定热流，并由探测器扫描获得表面温度分布状态，以确定内部缺陷的部位和形态
优点	可对役前和在役容器进行整体检测评定，效率高、速度快，受材料影响小，可连续监控探测	可获得二维灰度图像，且图像清晰直观、分辨率高、不受工件几何形状的限制	检测速度快、效率高，非接触，不需专门磁化装置，无需对检测表面进行处理，对缺陷可早期诊断	非接触，检测速度快，对人无伤害
局限性	不能检测静态缺陷，被检工件需处于应力状态，换能器应与工件接触良好，不能有噪声进入探测系统，设备投入大	设备投入太大，可移动性差	不适用于非铁磁性材料，尚不能对缺陷的形状、大小和性质进行定量、定性分析，需与常规方法结合使用	受材料的热导率、缺陷的几何尺寸、焊缝厚度和均匀度及热流的注入方向等因素影响大
适用对象	适用于检测动态裂纹、裂纹的产生和扩展率等	适用于缺陷检测、密度分布分析、缺陷的综合定性	适用于焊接缺陷定位，应力集中区域的确定	适合检测气孔、夹渣、裂纹及腐蚀缺陷等

表 8.2-5　不同材质焊缝探伤方法的选择

检验对象 \ 检验方法		射线照相	超声波探伤	磁粉探伤	渗透探伤	涡流探伤
铁素体钢焊缝	内部缺陷	◎	◎	×	×	—
	表面缺陷	△	△	◎	◎	△
奥氏体钢焊缝	内部缺陷	◎	△	×	×	—
	表面缺陷	△	△	×	◎	△
铝合金焊缝	内部缺陷	◎	◎	×	×	—
	表面缺陷	△	△	×	◎	△
其他金属焊缝	内部缺陷	◎	—	×	×	—
	表面缺陷	△	—	—	◎	△
塑料焊接接头		○	△	×	○	×

注：◎很适合；○适合；△有附加条件时适合；×不适合；—不相关。

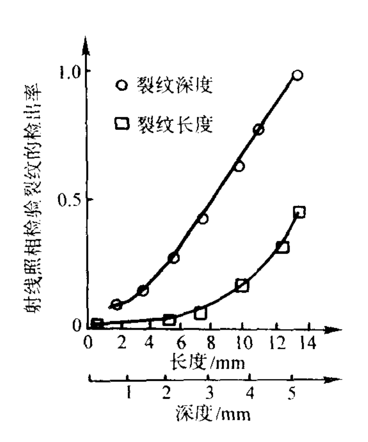


图 8.2-1　X射线照相裂纹检出率与裂纹深度和裂纹长度的关系

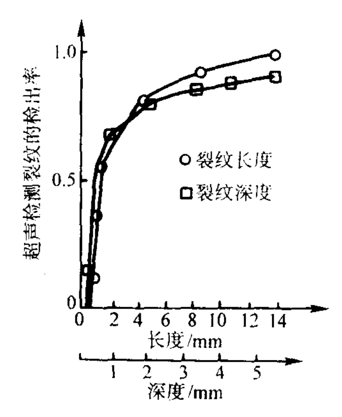


图 8.2-2　渗透探伤裂纹检出率与裂纹深度和裂纹长度的关系

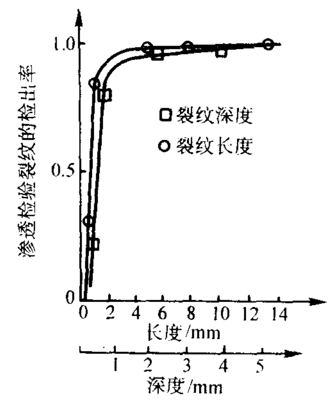


图 8.2-3　超声波探伤裂纹检出率与裂纹深度和裂纹长度的关系

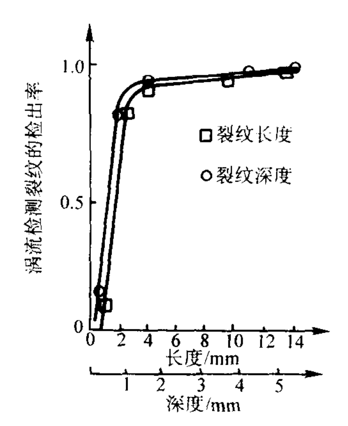


图 8.2-4　涡流探伤裂纹检出率与裂纹深度和裂纹长度的关系

2　焊缝射线照相

焊缝射线照相是检验焊缝完好性的传统方法，主要采用X射线和γ射线，能直观显示缺陷形状，特别适合于检测体积型缺陷，而对面积缺陷则取决于射线入射角度。

2.1　射线照相原理

焊缝射线照相是利用（X、γ）射线源发出的贯穿性辐射线穿透焊缝后使胶片感光，焊缝中的缺陷影像便显示在经过暗室处理后的射线照相底片上，如图8.2-5所示。

2.2　射线源的选择

焊缝射线照相中，射线源种类很多，主要分X射线机、γ射线机和电子加速器，如图8.2-5，常见射线装置见表8.2-6。射线照相的主要参数之一是射线能量与射线源尺寸。射线源尺寸愈小缺陷影像愈清晰。在能保证穿透焊件使胶片感光的前提下，应尽量选择较低射线能量，以提高缺陷影像的反差。500 kV以下X射线穿透不同材料和厚度所允许使用的最高管电压见图8.2-6，γ和1MeV以上X射线对钢、铜和镍基合金材料所适用的穿透厚度范围见表8.2-7。

2.3　射线胶片的选择

射线穿透工件后形成的缺陷潜影是眼睛观察不到的，利用胶片表面乳胶膜的感光特性可以把射线强度潜影转化成可见影像。乳胶膜由能够感光的银盐颗粒和明胶构成，银盐颗粒越细越容易看出缺陷影像的细节。因此，胶片的质量可以用乳剂层中的银盐颗粒度、感光度和对比度来表达。常用的工业射线照相胶片系统分为六个类别四个等级，见表8.2-8。银盐颗粒度愈小，缺陷影像愈清晰；但是感光速度变慢，曝光量会成倍增加。因此，只在检测细小裂纹等缺陷时才选用颗粒细或很细的胶片。

射线束中的射线量子射到胶片银盐颗粒上以后除了使其感光外，量子的剩余能量会使银盐颗粒释放出自由电子并使其周围颗粒再次感光，形成一个感光圆而不是一个感光点，因而影像不是很清晰。胶片不清晰程度（U_t）主要取决于乳胶膜中的银含量与明胶比，并且与射线能量有很大关系，见表8.2-9。

2.4　增感屏的选择

射线照相采用的增感屏分为荧光、金属荧光和金属等三类，前两种在焊缝的检验中已基本不采用，而广泛应用的是金属增感屏。对增感屏的基本要求是厚度均匀；表面光滑平整；有一定的刚性和不易损伤等。金属增感屏的尺寸相同，其厚度依据射线种类和胶片系统类别按表8.2-10和表8.2-11的推荐值进行选择。

2.5　射线透照布置

射线照相检验中，涉及到不同的工件，必须根据所检工件的特点，采用适当的透照布置。按照被检测对象，透照厚度，射源、被检焊缝和胶片之间的位置关系，透照布置可分为：纵缝单壁透照布置；环缝单壁外透法；环缝单壁内透法（包括中心法和偏心法）；双壁单影法；双壁双影法（包括椭圆透照和垂直透照）；角焊缝透照布置；不等厚透照布置（多胶片透照布置）等，其部分透照布置图例见图8.2-7，详尽的内容请参考GB/T 3323标准。

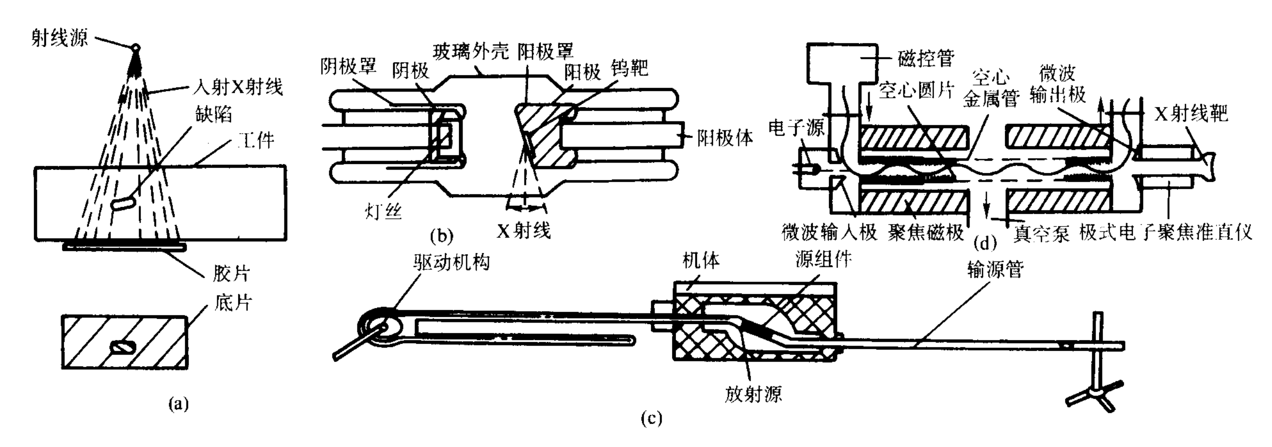


图 8.2-5　焊缝射线照相原理及主要装置示意

（a）焊缝射线照相原理；（b）X 射线管示意图；（c）γ 射线机示意图；（d）电子直线加速器示意图

表 8.2-6　常见射线装置的主要性能

类型		型号	管电压 /kV	管电流 /mA	焦点尺寸 /mm	钢最大穿透厚度 /mm	射线管质量 /kg	备注
X射线机	便携式	XXQ－2505	250	5	2.0×2.0	38	32	中国/玻壳
		300EG－S_2	300	5	2.5×2.5	53	20	日本/玻纹陶瓷管
	移动式	XY－3010	300	10 3	4.0×4.9 1.2×1.2	70	—	金属陶瓷管
	固定式	MG450	420	10	4.5×4.5	100	—	荷兰/金属陶瓷管
类型		型号	源种类	容量 /Ci	焦点尺寸 /mm	钢穿透厚度 /mm	本体质量 /kg	备注
γ射线机	便携式	DL－ⅡA	Ir192	100	2.0×3.0	10～100	20	中国/贫化轴屏壁
	移动式	TK－100	Co60	100	4.0×4.0	30～250	140	中国/贫化轴屏壁
类型		型号	能量 /MeV	X射线输出量 /(rem·(min·m)$^{-1}$	焦点尺寸 /mm	钢最大穿透厚度 /mm	1 m处照射范围 /mm	灵敏度 /%
电子加速器	直线式	沈变 25 MeV	25	60	0.1～2.0	300	ϕ200	0.6
	感应式	ML－15RⅡ	12	7 000	＜ϕ1	500	ϕ300	＜1
	回旋式	RM－8	8	1 500	ϕ2	—	—	1

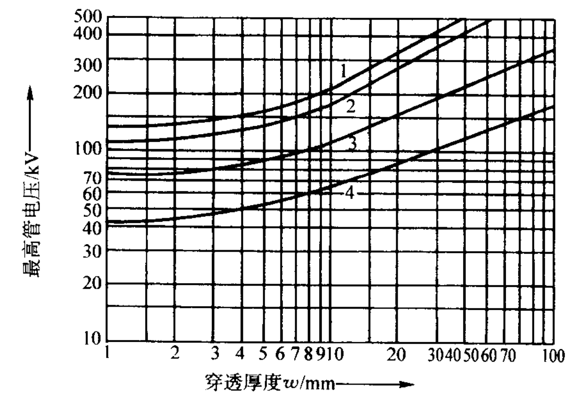


图 8.2-6　500 kV 以下 X 射线穿透不同材料和厚度所允许使用的最高管电压

1—铜、镍及其合金；2—钢；
3—钛及其合金；4—铝及其合金

表 8.2-7　γ 和 1 MeV 以上 X 射线对钢、铜和镍基合金材料所适用的穿透厚度范围（摘自 GB/T 3323）

射线种类		穿透厚度 w/mm A 级	穿透厚度 w/mm B 级
Tm170		$w\leqslant 5$	$w\leqslant 5$
Yb169①		$1\leqslant w\leqslant 15$	$2\leqslant w\leqslant 12$
Se75②		$10\leqslant w\leqslant 40$	$14\leqslant w\leqslant 40$
Ir192		$20\leqslant w\leqslant 100$	$20\leqslant w\leqslant 90$
Co60		$40\leqslant w\leqslant 200$	$60\leqslant w\leqslant 150$
X 射线 /MeV	1～4	$30\leqslant w\leqslant 200$	$50\leqslant w\leqslant 180$
	＞4～12	$w\geqslant 50$	$w\geqslant 80$
	＞12	$w\geqslant 80$	$w\geqslant 100$

① 对铝和钛的穿透厚度为：A 级时，$10<w<70$；B 级时，$25<w<55$。

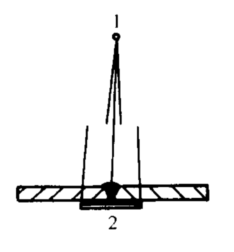
② 对铝和钛的穿透厚度为：A 级时，$35\leqslant w\leqslant 120$。

表 8.2-8 工业 X 射线胶片的分类和特性

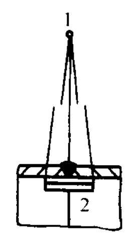
胶片系统类别		粒度/μm	感光度	对比度	对应胶片					适用范围
					天津	Agfa	Kodak	Fuji	Do Pont	
C1 C2	T1	很细 0.07～0.25	很慢 4.1～10.1	很高 4.0～8.0	—	D2 D3	SR DR R	25 50	NDT 35 45	检查铝合金，铅屏增感或不增感
C3 C4	T2	细 0.27～0.46	慢 1.6～2.85	高 3.7～7.5	V	D4 D5	M MX T	59 80	NDT 55	检查细裂纹，也用来检查轻金属
C5	T3	中 0.57～0.66	中 1.0	中 3.5～6.8	Ⅲ	D7 C7	AX AA CX	100	NDT 65 70	检查钢焊缝
C6	T4	粗 0.67～1.05	快 0.6～0.7	低 3.0～6.0	Ⅱ	D8 D10	RP	150 400	NDT 75 89	采用荧光增感检验厚件，弥补射线穿透能力不足

表 8.2-9 胶片不清晰度 U_f 与射线能量之间关系的试验值

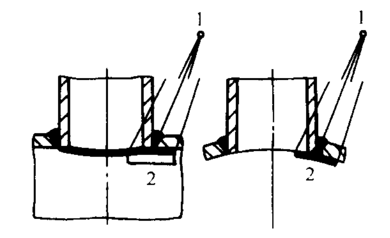
能量/MV	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	1.00	2.00	5.00	8.00	20.0	24.0	Ir192	Co60
U_f/mm	0.03	0.05	0.09	0.12	0.15	0.24	0.32	0.45	0.60	0.80	0.95	0.17	0.35



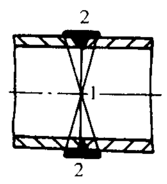
(a) 纵缝单壁透照布置

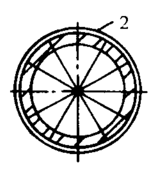


(b) 环缝单壁外透法透照布置

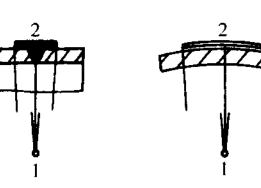


(c) 插入式管座焊缝单壁外透法透照布置

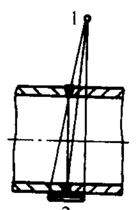


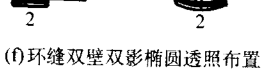


(d) 环缝周向曝光透照布置

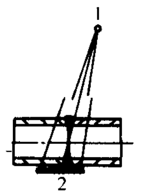


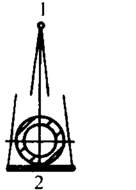
(e) 环缝单壁偏心内透法透照布置



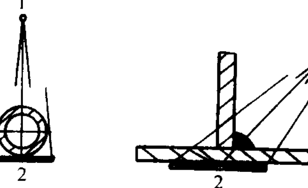


(f) 环缝双壁双影椭圆透照布置



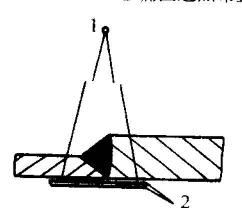


(g) 环缝双壁双影垂直透照布置



(h) 环缝双壁单影法的透照布置（像质计位于胶片侧）

(i) 角焊缝透照布置



(j) 不等厚对接焊缝多胶片透照布置

图 8.2-7 射线照相透照布置图例

1—射线源；2—胶片

表 8.2-10 钢、铜和镍基合金射线照相所适用的胶片系统类别和金属增感屏（摘自 GB/T 3323）

射线种类	穿透厚度 w /mm	胶片系统类别[①]		金属增感屏类型和厚度 /mm	
		A 级	B 级	A 级	B 级
X 射线≤100 kV	—	C5	C3	不用屏或用铅屏（前后）≤0.03	
X 射线＞100～150 kV				铅屏（前后）≤0.15	
X 射线＞150～250 kV			C4	铅屏（前后）0.02～0.15	



续表 8.2-10

射线种类	穿透厚度 w /mm	胶片系统类别[1]		金属增感屏类型和厚度 /mm	
		A 级	B 级	A 级	B 级
Yb169	$w<5$	C5	C3	铅屏（前后）≤0.03，或不用屏	
Tm170	$w\geq5$		C4	铅屏（前后）0.02～0.15	
X 射线 >250～500 kV	$w\leq50$	C5	C4	铅屏（前后）0.02～0.2	
	$w>50$		C5	前铅屏 0.1～0.2[2]；后铅屏 0.02～0.2	
Se75		C5	C4	铅屏（前后）0.1～0.2	
Ir 192	—	C5	C4	前铅屏 0.02～0.2[2]	前铅屏 0.1～0.2[2]
				后铅屏 0.02～0.2	
Co60	$w\leq100$	C5	C4	钢或铜屏（前后）0.25～0.7[3]	
	$w>100$		C5		
X 射线 1～4 MeV	$w\leq100$	C5	C3	钢或铜屏（前后）0.25～0.7[3]	
	$w>100$		C5		
X 射线 >4～12 MeV	$w\leq100$	C4	C4	铜、钢或钽前屏≤1[4]	
	$100<w\leq300$	C5	C4	铜或钢后屏≤1，钽后屏≤0.5[4]	
	$w>300$		C5		
X 射线 >12 MeV	$w\leq100$	C4	—	钽前屏≤1[5]	
	$100<w\leq300$	C5	C4	钽后屏不用	
	$w>300$		C5	钽前屏≤1[5]；钽后屏≤0.5	

① 也可使用更好的胶片系统类别。
② 只要在工件与胶片之间加 0.1 mm 附加铅屏，就可使用前屏≤0.03 mm 的真空包装胶片。
③ A 级，也可使用 0.5～2 mm 铅屏。
④ 经合同各方商定，A 级可用 0.5～1 mm 铅屏。
⑤ 经合同各方商定可使用钨屏。

表 8.2-11　铝和钛射线照相所适用的胶片系统类别和金属增感屏（摘自 GB/T 3323）

射线种类	胶片系统类别[1]		金属增感屏类型和厚度 /mm
	A 级	B 级	
X 射线≤150 kV	C5	C3	不用屏或铅前屏≤0.03；后屏≤0.15
X 射线 >150～250 kV			铅屏（前后）0.02～0.15
X 射线 >250～500 kV			铅屏（前后）0.1～0.2
Yb 169			铅屏（前后）0.02～0.15
Se 75			铅前屏 0.2[2]；后屏 0.1～0.2

① 也可使用更好的胶片系统类别。
② 可用 0.1 mm 铅屏附加 0.1 mm 滤光板取代 0.2 mm 铅屏。

2.6　射线照相检验级别

为了评定射线照相技术对缺陷影像质量的影响，习惯上在工件的表面放置一个钢丝型或阶梯孔型的像质计进行透照，然后通过观察所得到的底片黑度均匀区域内可识别的最小钢丝直径或孔径的影像用来衡量射线照相技术与底片处理过程的质量，简称像质计数值或像质计灵敏度。

底片上影像的质量与射线照相技术和器材有关，按照采用的射线源种类及其能量的高低、胶片类型、增感方式、底片黑度、射源尺寸和射源与胶片距离等参数，可以把射线照相技术划分为若干个质量级别。例如 GB/T 3323《金属熔化焊焊接接头射线照相》标准中就把射线照相技术的质量分为 A 级和 B 级，质量级别顺次增高，因此可根据产品的检验要求来选择合适的检验级别，其中 A 级为普通级、B 级为优化级。标准中规定，不同透照厚度和检验级别的像质计数值应达到表 8.2-12 和表 8.2-13 的要求。

2.7　射线照相的像质计灵敏度与裂纹的检出率

射线照相的像质计灵敏度（即像质计数值）与钢丝影像在底片上的对比度和清晰度有关。研究表明：像质计灵敏度与缺陷的检出率没有直接关系，特别是裂纹的检出能力与像质计灵敏度的关系更小。反之，底片的清晰度与裂纹的检出率有较大的相关性。清晰度可由影像的虚影大小来测量，其值与透照技术中占主导的几何不清晰度（U_g，该值近似与射线源尺寸成正比以及与射源到胶片间的距离 SFD 成反比）和胶片固有不清晰度（U_f）有关。几何不清晰度（由 U_g/U_f

度量）对像质计灵敏度与裂纹检出率的影响见图 8.2-8。从图中可以看出：像质计灵敏度与几何不清晰度关系不大，甚至当几何不清晰度 U_g 的变化范围达（0.5～2.5）U_t 时，可识别像质计钢丝影像的直径仅变化一根；反之，裂纹检出率的改变却很大，为提高裂纹的检出率，还应该使射线束尽可能与裂纹的方向平行。

表 8.2-12　不同检验级别和透照厚度应达到的线型像质计数值（摘自 GB/T 3323）

像质计数值		公称厚度 t/mm		穿透厚度 w/mm			
应识别的丝号	应识别的孔径/mm	单壁透照（A级）	单壁透照（B级）	双壁双影（A级）	双壁双影（B级）	双壁单影或双影（A级）	双壁单影或双影（B级）
		像质计（IQI）置于射源侧		像质计（IQI）置于射源侧		像质计（IQI）置于胶片侧	
W19	0.050	—	$t\leqslant1.5$	—	$w\leqslant1.5$	—	$w\leqslant1.5$
W18	0.063	$t\leqslant1.2$	$1.5<t\leqslant2.5$	$w\leqslant1.2$	$1.5<w\leqslant2.5$	$w\leqslant1.2$	$1.5<w\leqslant2.5$
W17	0.080	$1.2<t\leqslant2.0$	$2.5<t\leqslant4.0$	$1.2<w\leqslant2.0$	$2.5<w\leqslant4.0$	$1.2<w\leqslant2.0$	$2.5<w\leqslant4.0$
W16	0.100	$2.0<t\leqslant3.5$	$4.0<t\leqslant6.0$	$2.0<w\leqslant3.5$	$4.0<w\leqslant6.0$	$2.0<w\leqslant3.5$	$4.0<w\leqslant6.0$
W15	0.125	$3.5<t\leqslant5.0$	$6.0<t\leqslant8.0$	$3.5<w\leqslant5.0$	$6.0<w\leqslant8.0$	$3.5<w\leqslant5.0$	$6.0<w\leqslant12$
W14	0.16	$5.0<t\leqslant7.0$	$8.0<t\leqslant12$	$5.0<w\leqslant7.0$	$8.0<w\leqslant15$	$5.0<w\leqslant10$	$12<w\leqslant18$
W13	0.20	$7.0<t\leqslant10$	$12<t\leqslant20$	$7.0<w\leqslant12$	$15<w\leqslant25$	$10<w\leqslant15$	$18<w\leqslant30$
W12	0.25	$10<t\leqslant15$	$20<t\leqslant30$	$12<w\leqslant18$	$25<w\leqslant38$	$15<w\leqslant22$	$30<w\leqslant45$
W11	0.32	$15<t\leqslant25$	$30<t\leqslant35$	$18<w\leqslant30$	$38<w\leqslant45$	$22<w\leqslant38$	$45<w\leqslant55$
W10	0.40	$25<t\leqslant32$	$35<t\leqslant45$	$30<w\leqslant40$	$45<w\leqslant55$	$38<w\leqslant48$	$55<w\leqslant70$
W9	0.50	$32<t\leqslant40$	$45<t\leqslant65$	$40<w\leqslant50$	$55<w\leqslant70$	$48<w\leqslant60$	$70<w\leqslant100$
W8	0.63	$40<t\leqslant55$	$65<t\leqslant120$	$50<w\leqslant60$	$70<w\leqslant100$	$60<w\leqslant85$	$100<w\leqslant180$
W7	0.80	$55<t\leqslant85$	$120<t\leqslant200$	$60<w\leqslant85$	$100<w\leqslant170$	$85<w\leqslant125$	$180<w\leqslant300$
W6	1.00	$85<t\leqslant150$	$200<t\leqslant350$	$85<w\leqslant120$	$170<w\leqslant250$	$125<w\leqslant225$	$w>300$
W5	1.25	$150<t\leqslant250$	$t>350$	$120<w\leqslant220$	$w>250$	$225<w\leqslant375$	—
W4	1.60	$t>250$	—	$220<w\leqslant380$	—	$w>375$	—
W3	2.00	—	—	$w>380$	—	—	—
W2	2.50	—	—	—	—	—	—
W1	3.20	—	—	—	—	—	—

表 8.2-13　不同检验级别和透照厚度应达到的阶梯孔型像质计数值（摘自 GB/T 3323）

像质计数值		公称厚度 t/mm		穿透厚度 w/mm			
应识别的孔号	应识别的孔径/mm	单壁透照（A级）	单壁透照（B级）	双壁双影（A级）	双壁双影（B级）	双壁单影或双影（A级）	双壁单影或双影（B级）
		像质计（IQI）置于射源侧		像质计（IQI）置于射源侧		像质计（IQI）置于胶片侧	
H1	0.125	—	—	—	—	—	—
H2	0.160	—	$t\leqslant2.5$	—	$w\leqslant1.0$	—	$w\leqslant2.5$
H3	0.200	$t\leqslant2.0$	$2.5<t\leqslant4.0$	$w\leqslant1.0$	$1.0<w\leqslant2.5$	$w\leqslant2.0$	$2.5<w\leqslant5.5$
H4	0.250	$2.0<t\leqslant3.5$	$4.0<t\leqslant8.0$	$1.0<w\leqslant2.0$	$2.5<w\leqslant4.0$	$2.0<w\leqslant5.0$	$5.5<w\leqslant9.5$



续表 8.2-13

像质计数值		公称厚度 t/mm		穿透厚度 w/mm			
应识别的孔号	应识别的孔径/mm	单壁透照（A级）	单壁透照（B级）	双壁双影（A级）	双壁双影（B级）	双壁单影或双影（A级）	双壁单影或双影（B级）
		像质计（IQI）置于射源侧		像质计（IQI）置于射源侧		像质计（IQI）置于胶片侧	
H5	0.320	$3.5<t\leqslant6.0$	$8.0<t\leqslant12$	$2.0<w\leqslant3.5$	$4.0<w\leqslant6.0$	$5.0<w\leqslant9.0$	$9.5<w\leqslant15$
H6	0.400	$6.0<t\leqslant10$	$12<t\leqslant20$	$3.5<w\leqslant5.5$	$6.0<w\leqslant11$	$9.0<w\leqslant14$	$15<w\leqslant24$
H7	0.500	$10<t\leqslant15$	$20<t\leqslant30$	$5.5<w\leqslant10$	$11<w\leqslant20$	$14<w\leqslant22$	$24<w\leqslant40$
H8	0.630	$15<t\leqslant24$	$30<t\leqslant40$	$10<w\leqslant19$	$20<w\leqslant35$	$22<w\leqslant36$	$40<w\leqslant60$
H9	0.800	$24<t\leqslant30$	$40<t\leqslant60$	$19<w\leqslant35$	—	$36<w\leqslant50$	$60<w\leqslant80$
H10	1.000	$30<t\leqslant40$	$60<t\leqslant80$	—	—	$50<w\leqslant80$	—
H11	1.250	$40<t\leqslant60$	$80<t\leqslant100$	—	—	—	—
H12	1.600	$60<t\leqslant100$	$100<t\leqslant150$	—	—	—	—
H13	2.000	$100<t\leqslant150$	$150<t\leqslant200$	—	—	—	—
H14	2.500	$150<t\leqslant200$	$200<t\leqslant250$	—	—	—	—
H15	3.200	$200<t\leqslant250$	—	—	—	—	—
H16	4.000	$250<t\leqslant320$	—	—	—	—	—
H17	5.000	$320<t\leqslant400$	—	—	—	—	—
H18	6.300	$t>400$	—	—	—	—	—

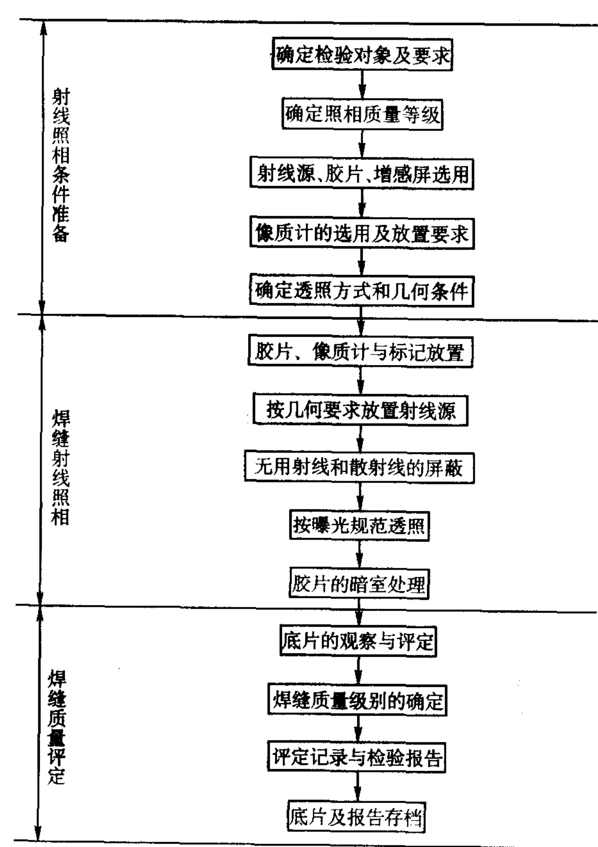


图 8.2-8　焊缝射线照相的一般程度

2.8　焊缝射线照相的一般程序

焊缝射线照相前首先应充分了解被检验焊接件的材质、焊接方法和几何尺寸等参数，确定检验要求与验收标准，然后选择射源、胶片、增感屏和像质计等，并进一步确定透照方式和几何条件。焊缝射线照相的一般程序见图 8.2-9。

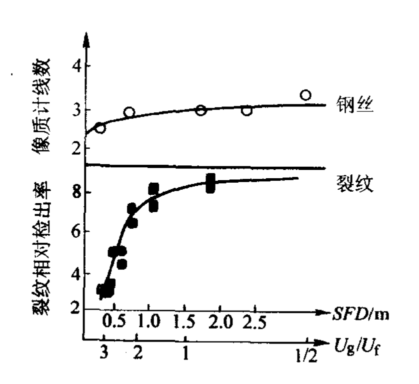
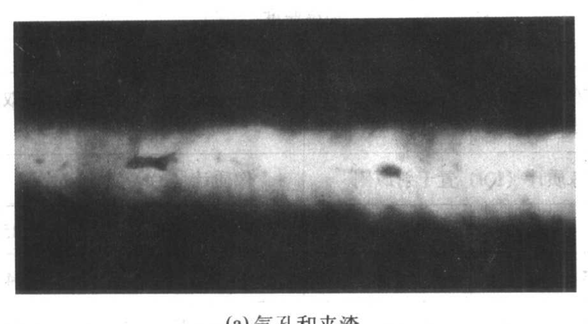


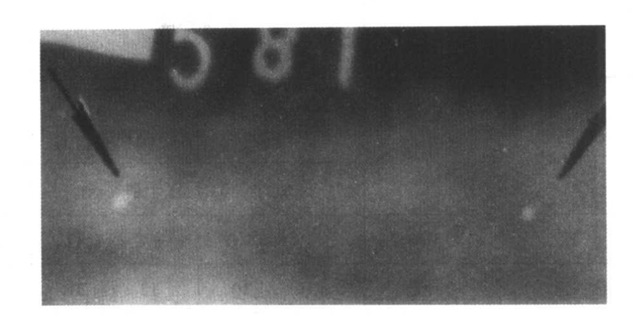
图 8.2-9　像质计灵敏度和裂纹相对检出率与几何不清晰度的关系

2.9　底片上缺陷影像的识别

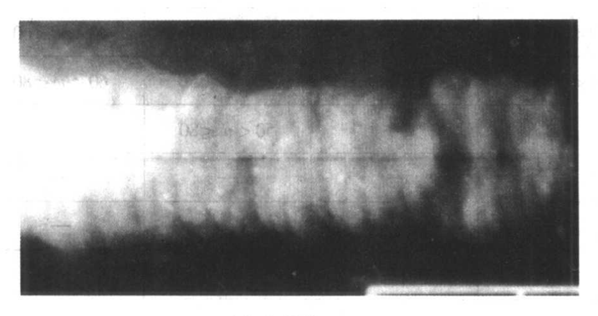
焊缝缺陷一般可分为裂纹、气孔、夹渣、未熔合与未焊透、形状缺陷以及其他缺陷等 6 类。在焊缝射线照相底片上除上述缺陷影像外，还可能出现一些伪缺陷影像，应注意区分以避免将其按焊缝缺陷处理，造成误判。其中几种常见焊接缺陷和伪缺陷影像的特征见图 8.2-10 和表 8.2-14。



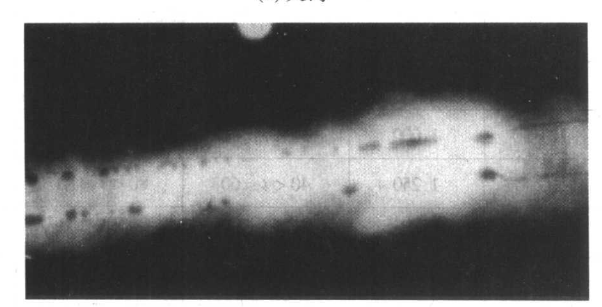
(a) 气孔和夹渣



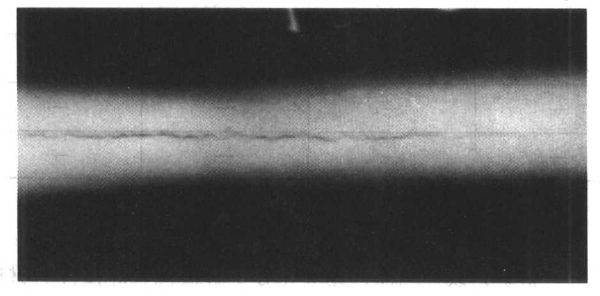
(b) 夹钨



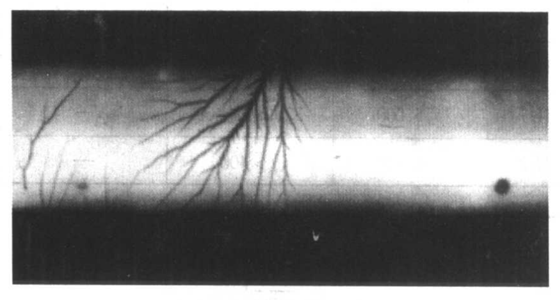
(c) 未焊透



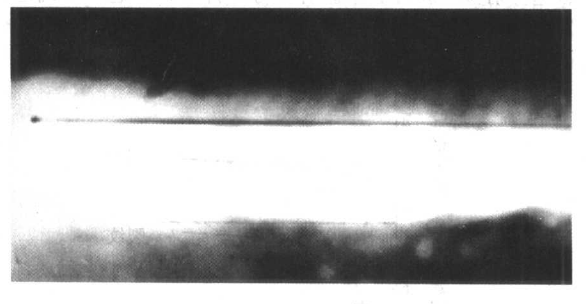
(d) 未熔合



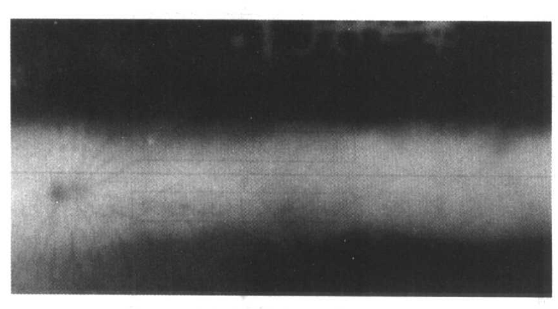
(e) 纵向裂纹



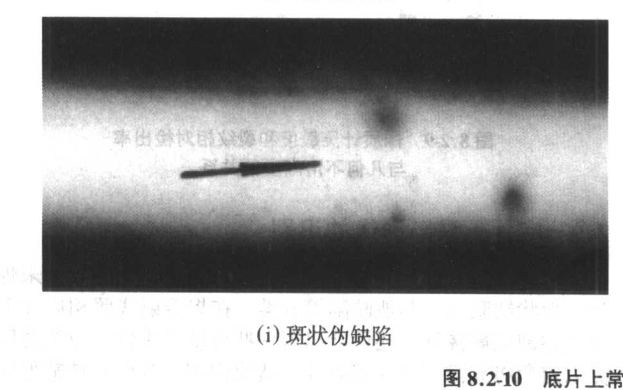
(f) 树枝状伪缺陷



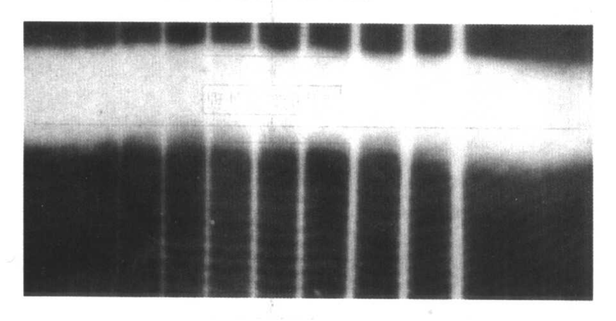
(g) 线状伪缺陷



(h) 蜘蛛状伪缺陷



(i) 斑状伪缺陷



(j) 波浪状伪缺陷

图 8.2-10 底片上常见焊接缺陷和伪缺陷影像



表 8.2-14 底片上常见焊接缺陷和伪缺陷影像的特征

缺陷种类	缺陷影像特征	产生原因
气 孔	多数为圆形、椭圆形黑点，其中心黑度较大，也有针状、柱状气孔。其分布情况不一，有密集的、单个的和链状的	1）焊条受潮 2）焊接处有锈、油污等 3）焊接速度太快或弧长过长 4）母材坡口处存在夹层 5）自动焊产生明弧现象
夹 渣	形状不规则，有点、条块等，黑度不均匀。一般条状夹渣都与焊缝平行，或与未焊透、未熔合等混合出现	1）运条不当，焊接电流过小，坡口角度过小 2）焊件上有锈，焊条药皮性能不当等 3）多层焊时，层间清渣不彻底
未焊透	在底片上呈现规则的、直线状的黑色线条，常伴有气孔或夹渣。在 X 形、V 形坡口的焊缝中，根部未焊透都出现在焊缝中间，K 形坡口则偏离焊缝中心	1）间隙太小 2）焊接电流或电压不当 3）焊接速度太快 4）坡口不正常等
未熔合	坡口未熔合影像一般一侧平直另一侧有弯曲，黑度淡而均匀，时常伴有夹渣。层间未熔合影像不规则，且不易分辨	1）坡口不够清洁 2）坡口尺寸不当 3）焊接电流或电压小 4）焊条直径或种类不对
裂 纹	一般呈直线或略带锯齿状的细纹，轮廓分明，两端尖细，中部稍宽，有时呈现树枝状影像	1）母材与焊接材料不当 2）焊接热处理不当 3）应力太大或应力集中 4）焊接工艺不正确
夹 钨	底片上呈现圆形或不规则的亮斑点，且轮廓清晰	采用钨极气体保护焊时，钨极爆裂或熔化的钨粒进入焊缝金属
伪缺陷	细小霉斑	底片陈旧发霉
	底片角上边缘有雾	暗盒封闭不严，漏光
	普遍严重发灰	红灯不安全，显影液失效或胶片存放不当或过期
	暗黑色珠状影像	显影处理前溅上显影液滴
	黑色枝状条纹	静电感光
	密集黑色小点	定影时，银粒子流动
	黑度较大的点和线	局部受机械压伤或划伤
	淡色圆环斑	显影过程中有气泡
	淡色斑点或区域	增感屏损坏或夹有纸片，显影前胶片上溅上定影液也会产生这种现象

2.10 射线照相底片的评定——GB/T 3323 标准附录摘要

首先应对底片本身质量进行检查，看其像质计数值、黑度、识别标记与伪缺陷影像等指标是否达到标准的要求，对于合格底片则根据缺陷的性质和数量进行焊接接头质量评级，即：

Ⅰ级焊接接头，应无裂纹、未熔合、未焊透和条形缺陷；

Ⅱ级焊接接头，应无裂纹、未熔合和未焊透；

Ⅲ级焊接接头，应无裂纹、未熔合以及双面焊和加垫板的单面焊中的未焊透；

Ⅳ级焊接接头，焊接接头中缺陷超过Ⅲ级者。

评定厚度的确定：评定厚度 T 是指用于缺陷评定的母材厚度或角焊缝厚度。对接焊缝的评定厚度是指母材的公称厚度。不等厚材料对接时，取其中较薄的母材公称厚度；T 形接头时，取制备坡口的母材公称厚度。角焊缝的评定厚度是指角焊缝的理论厚度。

（1）圆形缺陷评级

长宽比不超过 3 的缺陷定义为圆形缺陷。它们可以是圆形、椭圆形、锥形或带有尾巴（在测定尺寸时应包括尾部）等不规则的形状。包括气孔、夹渣和夹钨。

圆形缺陷用评定区域进行评定，评定区域的大小见表 8.2-15。评定区域应选在缺陷最严重的部位。

表 8.2-15 缺陷评定区 mm

评定厚度 T	$\leqslant 25$	$25 < T \leqslant 100$	>100
评定区尺寸	10×10	10×20	10×30

评定圆形缺陷时，应将缺陷尺寸按表 8.2-16 换算成缺陷点数。不计点数的缺陷尺寸见表 8.2-17。

表 8.2-16　缺陷点数换算表

缺陷长径/mm	≤1	>1~2	>2~3	>3~4	>4~6	>6~8	>8
点　数	1	2	3	6	10	15	25

表 8.2-17　不计点数的缺陷尺寸　mm

评定厚度 T	缺陷长径
≤25	≤0.5
>25~50	≤0.7
>50	≤1.4% T

当缺陷与评定区域边界线相接时，应把它划入该评定区域内计算点数。对黑度大的圆形缺陷定义为深孔缺陷，深孔缺陷时评为Ⅳ级。圆形缺陷的分级见表 8.2-18。

(2) 条形缺陷评级

长宽比大于 3 的气孔、夹渣和夹钨定义为条形缺陷。条形缺陷的分级见表 8.2-19。

表 8.2-18　圆形缺陷的分级

评定区/mm		10×10			10×20		10×30
评定厚度 T/mm		≤10	>10~15	>15~25	>25~50	>50~100	>100
质量等级	Ⅰ	1	2	3	4	5	6
	Ⅱ	3	6	9	12	15	18
	Ⅲ	6	12	18	24	30	36
	Ⅳ	缺陷点数大于Ⅲ级者					

注：表中的数字是允许缺陷点数的上限。

表 8.2-19　条形缺陷的分级　mm

质量等级	评定厚度 T:单个条形缺陷长度	条形缺陷总长
Ⅱ	$T\leq12:4$ $12<T<60:\frac{1}{3}T$ $T\geq60:20$	在平行于焊缝轴线的任意直线上，相邻两缺陷间距均不超过 $6L$ 的任何一组缺陷，其累计长度在 $12T$ 焊缝长度内不超过 T
Ⅲ	$T\leq9:6$ $9<T<45:\frac{2}{3}T$ $T\geq45$: 30	在平行于焊缝轴线的任意直线上，相邻两缺陷间距均不超过 $3L$ 的任何一组缺陷，其累计长度在 $6T$ 焊缝长度内不超过 T
Ⅳ	大于Ⅲ级者	

注：表中"L"为该组缺陷中最长者的长度。

(3) 未焊透评级

不加垫板的单面焊中未焊透的允许长度，应按表 8.2-19 条形缺陷的Ⅲ级评定。

角焊缝的未焊透是指角焊缝的实际熔深未达到理论熔深值，应按表 8.2-19 条形缺陷的Ⅲ级评定。

设计焊缝系数不大于 0.75 的钢管根部未焊透的分级见表 8.2-20。

表 8.2-20　未焊透的分级

质量等级	未焊透的深度		长　度 /mm
	占壁厚的百分数 /%	深　度 /mm	
Ⅱ	≤15	≤1.5	≤10%周长
Ⅲ	≤20	≤2.0	≤15%周长
Ⅳ	大于Ⅲ级者		

(4) 根部内凹和根部咬边评级

钢管根部内凹缺陷和根部咬边的分级见表 8.2-21。

表 8.2-21　根部内凹和根部咬边缺陷的分级

质量等级	根部内凹的深度		长　度 /mm
	占壁厚的百分数 /%	深　度 /mm	
Ⅰ	≤10	≤1	不　限
Ⅱ	≤20	≤2	
Ⅲ	≤25	≤3	
Ⅳ	大于Ⅲ级者		

(5) 综合评级

在圆形缺陷评定区内，同时存在圆形缺陷和条形缺陷(或未焊透、根部内凹和根部咬边)时，应各自评级，将两种缺陷所评级别之和减 1 (或三种缺陷所评级别之和减 2)作为最终级别。

以上均系以金属熔化焊焊接接头射线照相标准 GB/T 3323 为基础进行的，对于钢以外的其他金属的射线照相，应注意选择同材质的像质计，相应的透照参数进行质量评级。不同金属相对于钢的射线照相等效系数见表 8.2-22。它可以

帮助选择射线的能量。

2.11　国外焊缝射线照相标准

欧洲 EN1435：1997 是被国外广泛使用并有重大影响的焊缝射线检测标准，其已被 ISO/TC44 “国际焊接及工艺委员会”转化为国际标准 ISO 17636。此次新修订的 GB 3323 标准也等效采用了 EN 1435：1997 标准，主要差别是 EN 1435：1997 标准不包含焊缝缺陷等级评定内容，其焊接接头缺陷可采用 EN25817（钢）或 EN30042（铝）的通用标准进行评定，也可采用射线专用的焊缝质量评定标准 EN12517 进行焊缝缺陷评级，三者的对应关系见表 8.2-23，其中 EN12517：1998 + A1：2002 的合格极限见表 8.2-24。

表 8.2-22　不同金属对钢的射线照相等效系数近似值（摘自 JB/T 9217—1999）

金　属	射线能量									
	100 kV	150 kV	220 kV	250 kV	400 kV	1 MeV	2 MeV	4 ~ 25 MeV	Ir192	Co60
镁	0.05	0.05	0.08	—	—	—	—	—	—	—
铝	0.08	0.12	0.18	—	—	—	—	—	0.35	0.35
铝合金	0.10	0.14	0.18	—	—	—	—	—	0.35	0.35
钛	—	0.54	0.54	—	0.71	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
铁/钢	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
铜	1.5	1.6	1.4	1.4	1.4	1.1	1.1	1.2	1.1	1.1
锌	—	1.4	1.3	—	1.3	—	—	1.2	1.1	1.0
黄铜	—	1.4	1.3	—	1.3	1.2	1.1	1.0	1.1	1.0
因康镍合金	—	1.4	1.3	—	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
蒙乃尔合金	1.7	—	1.2	—	—	—	—	—	—	—
锆	2.4	2.3	2.0	1.7	1.5	1.0	1.0	1.0	1.2	1.0
铅	14.0	14.0	12.1	—	—	5.0	2.5	2.7	4.0	2.3
铪	—	—	4.0	12.0	9.0	3.0	—	—	—	—
铀	—	—	20.0	16.0	12.0	4.0	—	3.9	12.6	3.4

表 8.2-23　射线照相技术的对应关系

EN 25817 或 EN 30042 的焊接缺陷评定等级	EN 1435 射线照相技术等级	EN 12517 的焊缝合格极限
B	B	1
C	B①	2
D	A	3

① 单张底片最大面积应满足 EN1435 等级 A 的规定。

表 8.2-24　EN12517 标准规定的焊缝合格极限　mm

序号	EN 26520 中缺陷名称	合格极限		
		3①	2①	1
1	裂　纹（100）	不允许	不允许	不允许
2	弧坑裂纹（104）	1 处/40 mm	不允许	不允许
3	气孔和弥散型气孔（2011、2013、2014、2017）	$l \leqslant 0.5S$ 且 $\leqslant 5$，$L = 12S$ 且 $\leqslant 150$ 时，$\sum l \leqslant S$	$l \leqslant 0.4S$ 且 $\leqslant 4$，$L = 12S$ 且 $\leqslant 150$ 时，$\sum l \leqslant S$	$l \leqslant 0.3S$ 且 $\leqslant 3$，$L = 12S$ 且 $\leqslant 150$ 时，$\sum l \leqslant S$
4	虫　孔（2016）	$l \leqslant 0.5S$ 且 $\leqslant 4$，$L = 12S$ 且 $\leqslant 150$ 时，$\sum l \leqslant S$	$l \leqslant 0.4S$ 且 $\leqslant 3$，$L = 12S$ 且 $\leqslant 150$ 时，$\sum l \leqslant S$	$l \leqslant 0.3S$ 且 $\leqslant 2$，$L = 12S$ 且 $\leqslant 150$ 时，$\sum l \leqslant S$
5	条状夹渣（300）和条状气孔（2015）	$l \leqslant 2S$，$L = 12S$ 且 $\leqslant 150$ 时，$\sum l \leqslant L/10$	$l \leqslant S$，$L = 12S$ 且 $\leqslant 150$ 时，$\sum l \leqslant L/10$	$l \leqslant 0.3S$ 且 $\leqslant 6$ 和 $l \leqslant 25$，$L = 12S$ 且 $\leqslant 150$ 时，$\sum l \leqslant S$
6	夹　铜（3042）	不允许		
7	未熔合（401）	断续且不在表面，$l \leqslant 25$ 和 $L = 12S$ 且 $\leqslant 150$ 时，$\sum l \leqslant 25$	不允许	不允许
8	未焊透（402）	$l \leqslant 25$ 和 $L = 12S$ 且 $\leqslant 150$ 时，$\sum l \leqslant 25$	不在表面，$l \leqslant 12$ 和 $L = 12S$ 且 $\leqslant 150$ 时，$\sum l \leqslant 15$	不允许
9②	咬　边（501）	圆滑且 $h \leqslant 1.5$	圆滑且 $h \leqslant 1.0$	圆滑且 $h \leqslant 0.5$
10②	塌　陷（504）	圆滑且 $h \leqslant 5$；$(1 + 1.2b)$	圆滑且 $h \leqslant 4$；$(1 + 0.6b)$	圆滑且 $h \leqslant 3$；$(1 + 0.3b)$
11②	焊　瘤（5041）	允许		圆滑，偶尔局部允许
12②	引弧点（601）	取决于母材的种类和裂纹的敏感性		
	飞　溅（602）	取决于母材的种类		

注：S 为对接焊缝公称厚度或不完全焊透时的熔透深度；l 为缺限长度；b 为焊缝宽度；L 为焊缝长度；h 为缺陷高度。

① 2 级和 3 级可冠以 ×，表示凡 $l > 25$ 者均不合格。

② 表面缺陷：合格极限是由外观检测所定义的，此类缺陷一般在外观检测当中来确定合格与否。

2.12　焊缝射线照相工艺卡

焊缝射线照相工艺卡是针对特定产品进行射线照相操作的指导性文件，其形式如表 8.2-25 所示。

表 8.2-25　射线照相检测工艺卡示例

产品名称	冷凝器	材料	16MnR	产品类别	Ⅱ	产品编号	RH004	工号	G
透照部位	纵缝试板	厚度	16	质量标准	GB 150—1998	照相标准	JB 4730—94		
射线源	XXG2505	焦点	2.0×2.0	像质计	FeⅢ	增感屏	铅：前 0.03，后 0.03		
胶片型号	AgfaC7	尺寸	360×80	暗室处理	手工	显影条件	时间 5 min　温度 20℃		
透照参数		工件草图与透照部位编号				透照布置示意图			
管电压 U/kV	175	S1　S2　300　300				源　标记与像质计　试件　胶片　背防护铅板			
管电流 I/mA	5								
曝光时间 t/min	1.5								
焦距 SFD/mm	600								
焦点至工件最小距离 f_{min}/mm	150								
透照长度 L/mm	300								
曝光次数 N	2								
像质计数值	11								
底片黑底	2.0~3.0								
检测比例	100%								
辅助措施	使用背保护铅板								
备注：									
单位：×××		编制：×××		审核：×××		批准：×××		日期：×××	

2.13　射线照相新技术——实时成像技术和工业 CT 技术

虽然采用胶片射线照相方式具有较好的分辨率与较高的对比度以及底片黑度动态范围大等特点，但由于胶片感光时，胶片吸收射线的效率低，从而导致曝光时间增加。又需要后续的显影、定影与干燥处理等，使得从照相到底片可观察的时间变得很长，成本也因而增高。另外，也难以实现检验过程的自动化，因此其应用范围受到一定的限制。

近年来，在替代传统胶片式射线照相技术中，实时成像技术和工业 CT 技术越来越受到人们的重视。其中实时成像技术能实现缺陷影像实时显示，主要有 X 射线图像增强器系统。它由 X 射线机、图像增强器、光学镜头、摄像机、图像采集卡、计算机主机（包括模拟量/数字量转换系统）、显示器、图像采集和评定及处理软件、图像存储系统等组成。它采用一种可以把 X 射线转化为光线的图像转换增强器放在待检工件后面，缺陷影像经过增强后亮度很高，增强系数达 100~1 000 倍，但尺寸缩小近 10 倍。缺陷的光学影像再经过大广角透镜组投射到摄像机上，然后传给计算机和显示器，如图 8.2-11 所示。由于亮度高，因此不需要高灵敏度摄影机即可以满足焊缝射线照相缺陷显示的要求。目前，其已进入工业焊接产品检测的实际应用阶段。

与实时成像技术相比，工业 CT 技术则是采用一面状射线束透射工件的一个层面，检测器阵列与射线束处于同一平面，通过机械驱动装置对工件形成一定的扫描透射，采集射线束穿过该层面的相关信息，并重建该层面的图像，就可直接观察到缺陷的位置、大小和形状，从而实现对这一层面的检测。工业 CT 系统一般由射线源、机械扫描系统、探测器与数据采集系统和计算机系统四部分构成，见图 8.2-12。其射线源主要采用低能 X 射线源、γ 射线源和高能 X 射线源三种。

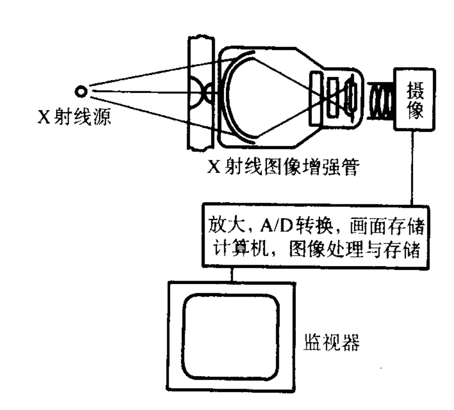


图 8.2-11　射线照相实时显示图像增强系统

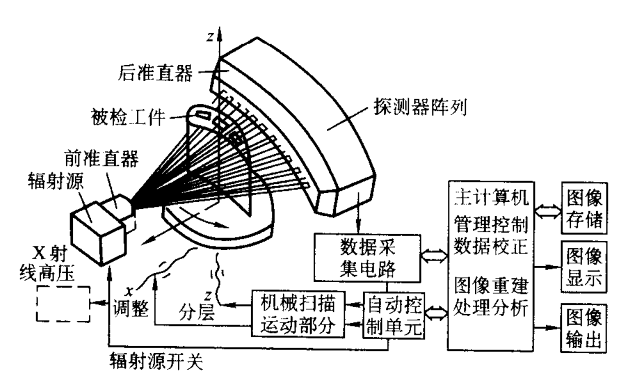
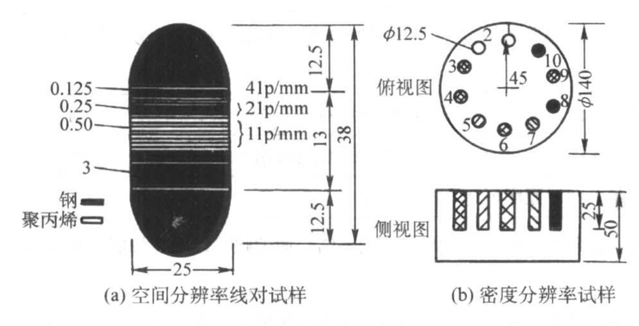


图 8.2-12　工业 CT 结构工件原理图



工业 CT 图像质量是通过测试卡进行控制的，其测试卡一般分空间分辨率测试卡和密度分辨率测试卡两类，如图 8.2-13。



(a) 空间分辨率线对试样　(b) 密度分辨率试样

图 8.2-13　工业 CT 图像质量测试卡

工业 CT 技术、胶片射线照相检测技术、缺陷实时成像技术的比较见表 8.2-26。

表 8.2-26　射线检测技术的特点比较

射线检测技术	射线吸收率/%			空间分辨率	动态范围	数字图像处理能力
	80 kV	420 kV	2 MeV			
胶片照相	约 5	约 2	约 0.5	> 5	2 ~ 10	需胶片扫描器
实时成像	约 20	约 8	约 2	约 2.5	5 ~ 20	典型为 8 bit 数据
CT 技术	约 99	约 95	约 80	0.2 ~ 4.5	约 10^4	典型为 16 bit 数据

3　焊缝超声波探伤

超声波探伤适合于检测焊缝中的平面型缺陷，如裂纹、未焊透和未熔合等。焊缝厚度较大时（例如 ≥20 mm），其优点愈明显。

3.1　超声波探伤原理和分类

利用压电换能器通过瞬间的电激发产生脉冲机械振动，借助于声耦合介质传入到焊缝金属中形成脉冲超声波。超声波在传播时如果遇到缺陷就会产生反射并返回到换能器，由于压电效应是可逆的，再把声脉冲信号转换成电脉冲信号。测量该信号的幅度及其传播时间就可评定工件中缺陷的位置及严重程度，如图 8.2-14 所示。

根据超声波的波形、发射和接收的方式，超声波探伤的方法也很多，其中常用的方法有穿透法、反射法、接触法、液浸法等，其分类见图 8.2-15。

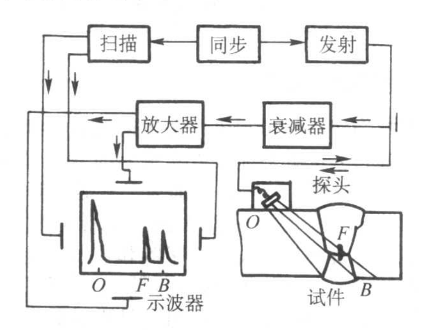


图 8.2-14　A 显示脉冲反射式焊缝超声波探伤原理图

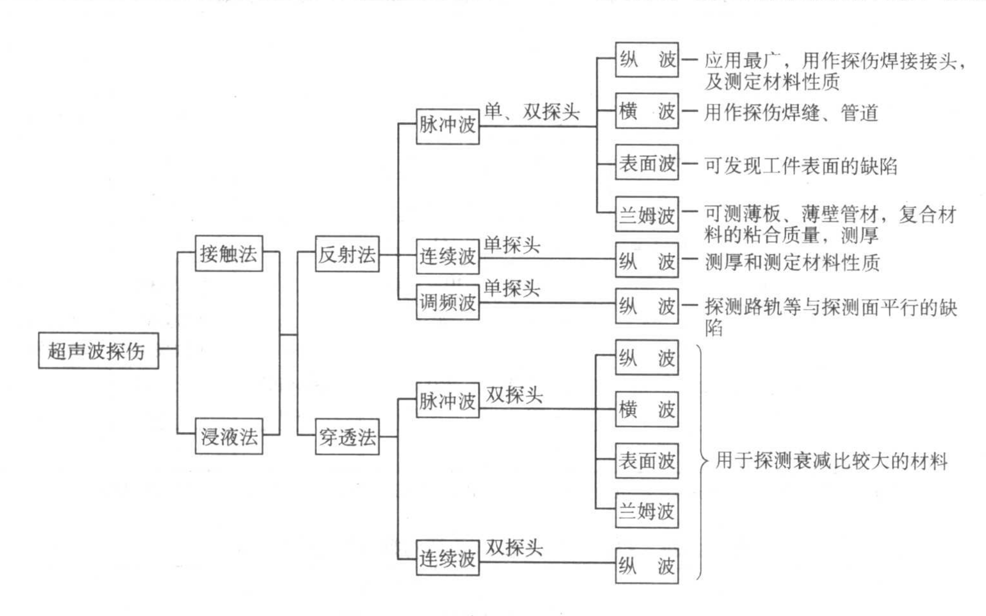


图 8.2-15　焊缝超声波探伤方法分类

3.2　超声波探伤的探头

探头是一种声电换能器。它由压电晶片、透声楔块和吸收阻尼背衬组成，见图 8.2-16。常用压电晶片材料有石英、硫酸锂和钛酸铅等，其功能为将电信号转换为声信号和相反的转换，称之为可逆压电效应。有机玻璃楔块可按一定方向把声波传送到焊缝中并完成反向传送。背衬可以吸收杂波以减小脉冲宽度。在超声波探伤过程中，除使用传统的纵波直探头、横波斜探头和双晶片探头以外，还可根据工件的特殊探伤要求选择各种角度专用的高功率探头、窄脉冲探头、双晶片探头、聚焦探头、爬行波探头、电磁声探头和相控阵探头等，各种探头的特点见表 8.2-27。

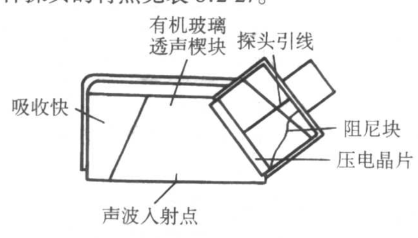


图 8.2-16　焊缝超声波探伤斜探头示意图



表 8.2-27 焊缝超声波探伤的各种探头的特点

探头类型	应用特点
纵波直探头	可发射和接收纵波且声束与被检工件的表面相垂直，使用广泛，主要用于板材、锻件、焊缝的补充检测等
横波斜探头	利用透声斜楔块使发射的声束以一定的倾角射入工件来进行探伤，主要用于焊缝检测，其角度规格很多，常用的有45°、60°、70°或K1、K1.5、K2.9、K2.5、K3.0等
双晶片探头	发射与接收晶片分开，始脉冲很窄，减小测量盲区。目前，在常规仪器上脉冲宽度可达0.3 μs以下
聚焦探头	波束变细，缺陷横向分辨率高，有利于测量缺陷的实际尺寸。目前，单一探头的聚焦区可达100～200 mm
窄脉冲探头	脉冲宽度窄，缺陷纵向分辨率高。目前，在常规仪器上脉冲宽度可达0.3 μs以下
爬行波探头	近表面传播的纵波，多采用发收分离式双晶片结构，适合于探测不锈钢堆焊层内和结合面的缺陷以及堆焊层下的再热裂纹
电磁声探头	可产生水平极化的横波，不需要耦合剂就可以在焊缝和探头间进行传播，适合于检测奥氏体不锈钢焊缝
相控阵探头	通过对按一定规则排列的压电换能元件的超声波发射时间或相位加以控制，可动态改变声束的位置与方向，从而以较少的探头和扫查动作来实现焊缝的快速全面扫查，目前主要用于压力容器和管道的熔化焊焊缝检测

3.3 超声波探伤仪器

超声波探伤仪器种类很多，按发射波的连续性可分为脉冲、连续、调频；按缺陷显示方式可分为A型显示、B型显示、C型显示；按声道可分为单通道、多通道等。

目前工业上最常用的手工A型显示脉冲反射式超声波探伤仪基本上是由同步、发射、接收和显示等电路组成。除了广泛采用的模拟电路仪器外，还可以选用新型的数字化超声波探伤仪。这种以单片或单板机为基础的数字超声波探伤仪，多数都具有存储探伤参数和缺陷波形、计算缺陷坐标位置以及打印检验结果等功能（例如能存储100组检验参数、缺陷波形以及上千点的测厚数据等）。其中利用场致发光或LCD显示屏幕的超小型数字超声波仪器，其体积和质量比常规示波管（CRT）仪器减少很多，屏幕亮度很高且与探测厚度无关，这样更方便了手工探伤操作。几种典型仪器的主要特征参数见表8.2-28。这些参数对探伤过程和结果的影响见表8.2-29。

表 8.2-28 常用的脉冲反射式超声波探伤仪的主要参数

特征参数 \ 仪器名称	CTS22	CTS23	CTS2000	USK7	USIP12	USN52	EPOC－Ⅲ	SONIC1200
探伤频率/MHz	0.5～10	0.5～20	0.5～20	0.5～10	0.5～25	0.3～12	0.5～15	1～20
增益或衰减/dB	80	90	110	104	120	110	100	110
近表面分辨力/mm	≥3	≥2	≥1.5	≥2	≥1.3	≥1.5	≥1.5	≥1.5
薄板分辨力/mm	—	≤1～1.2	0.6	≤1～1.5	0.5	0.6	0.6	0.6
探测范围/mm	10～1 200	5～5 000	0～5 000	10～1 000	5～15 000	5～5 000	4～5 000	5～5 000
屏幕尺寸/mm	68×55 CRT	68×55 CRT	96×72 LCD	70×55 CRT	100×80 CRT	146×67 场致发光	67×60 场致发光	60×66 场致发光
尺寸/mm（宽×高×长或厚）	254×110×335	254×140×335	226×172×50	240×95×300	360×195×450	250×133×146	156×289×48	241×140×90
质量/kg	6.2	7.2	1.6	5.1	18	2.7	1.2～2.2	1.6～2.7

注：仪器CTS：中国汕头；US：德国Krautkramer公司；EPOC：美国PANAMETRICS公司；SONIC：美国STAVELEY公司。

表 8.2-29 超声波探伤仪器参数对探伤过程的影响

仪器参数	对探伤过程的影响
探伤频率	由于声波绕射现象的限制，最高探伤灵敏度约为1/2波长。因此提高频率有利于发现小缺陷。频率高，脉冲宽度窄，波束直径小，分辨率高，反之，频率高，声衰减增大，不利于检测厚度大和晶粒粗的材料。碳钢与合金结构钢焊缝探伤频率为1～5 MHz，不锈钢焊缝为0.5～1.8 MHz
增益与衰减	仪器放大量约为100～120 dB，可调节范围在80～110 dB之间，此值愈高仪器适用范围（dB）愈大，灵敏度愈高。读数分档越细，测量精度越高。最细刻度分档为0.1～2 dB
发射脉冲	发射脉冲电压越高，发射声波强度越大，探测深度越深。一般为100～400 V之间，可探测焊缝厚度达350 mm。脉冲宽度越窄，缺陷的分辨能力越高，一般脉冲宽度为20～1 000 ns。脉冲升起时间越小，缺陷位置测量精度越高，一般小于15 ns
频带宽度	仪器频带宽度愈宽，阻塞时间愈小，上下表面探伤盲区愈小，薄板探伤分辨能力愈高。最大频带宽度可达15～30 MHz。最小探测盲区能达1.3～2 mm

3.4　检验级别

焊缝中缺陷的位置、形状和方向直接影响缺陷的声反射信号强度。由于缺陷存在的任意性，因此超声波探测焊缝的方向愈多，波束垂直于缺陷平面的概率愈大，缺陷的检出率也愈高。一般可根据对焊缝探测方向的多少，把超声波探伤划分为若干个检验级别。我国 GB/T 11345《钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果的分级》标准中把检验划分为 A、B、C 三个级别。检验的完善程度逐级升高。其中 B 级适合于受压容器。各级中的探伤面、探伤侧和探头角度的规定见表 8.2-30 和图 8.2-17。各级中规定的探伤面均应适当地修磨，表面粗糙度不超过 6.3 μm，以保证良好的声耦合。

表 8.2-30　焊缝超声波探伤的探伤面、侧和探头折射角（摘自 GB 11345—1989）

板厚/mm	探伤面			探伤方法	使用的探头折射角或 *K* 值
	A	B	C		
<25	单面探伤	单面双侧（1 和 2 或 3 和 4）或双面单侧（1 和 3 或 2 和 4）		直射法及一次反射法	70°（*K*2.5，*K*2.0）
>25~50					70°（*K*2.5，*K*2.0，*K*1.5）
>50~100	—			直射法	45°或 60°；45°和 60°，45°和 70°并用（*K*1.0 或 *K*1.5；*K*1.0 和 *K*1.5，*K*1.0 或 *K*2.0 并用）
>100	—	双面双侧			45°或 60°并用（*K*1.0 和 *K*1.5 或 *K*2.0 并用）

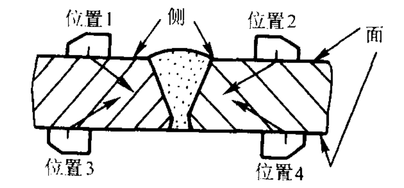
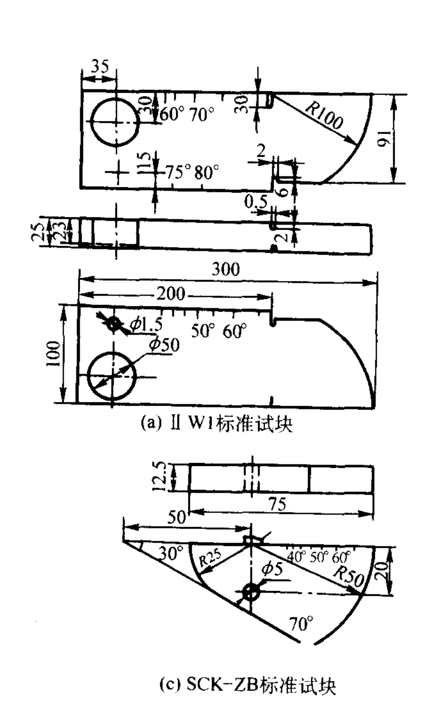


图 8.2-17　探伤面和探伤侧

3.5　超声波探伤灵敏度

超声波探伤的灵敏度是以发现同厚度同材质试块上规定尺寸的人工缺陷来衡量的。试块一般分标准试块和对比试块两类，其中标准试块是由权威机构统一规定的，是对仪器线性、探头角度等综合性能和组合灵敏度进行校验的试块，如国际焊接学会的ⅡW1、ⅡW2 试块和国内 CSK－ZB 试块，其结构见图 8.2-18a～c；而对比试块是针对具体检测对象，通过不同的人工反射体进行仪器的灵敏度调节的试块，常用的人工缺陷有长横孔、平底孔和短横孔等，其中长横孔试块见图 8.2-18d。为了提高钻孔精度，孔径不能太大与太小，一般取孔径 $d \geqslant 1.5\lambda$（波长），例如：GB/T 11345 标准中选定的长横孔直径为 3 mm。这样，不同检验级别的焊缝其探伤灵敏度规定的方法可以通过取 $\phi 3$ 孔反射波幅度的一定百分比来实现，例如：16%、20%等。另一方面，超声波探伤的灵敏度很高，可以发现很细小的焊缝缺陷，几乎不受工件厚度的限制，然而对于焊缝宏观质量控制来说，只有当缺陷尺寸超过毫米数量级才有实际意义。因此，各种标准对超声波探伤灵敏度都规定了一个起始界限值并都采用三挡评定原则，即评定线、定量线和判废线等灵敏度级别。当缺陷反射波幅度超过评定线时，才予以评定（估判其性质），超过定量线时，要测量其长度，超过判废线时，则判为不合格。GB/T 11345 标准中规定的各级灵敏度见表 8.2-31。表 8.2-31 中 DAC 代表不同深度 $\phi 3$ 孔反射波的高度在距离波幅坐标系中的连线，见图 8.2-19。为了计量方便起见，表中把衡量波幅的百分比换算成其对数的分贝值，即 dB 值（一般探伤仪器上均有 dB 刻度，其值可以直接读出）。



(a) ⅡW1标准试块

(c) SCK-ZB标准试块

(b) ⅡW2标准试件

有机玻璃

(d) RB-2长横孔对比试块

图 8.2-18　超声波试块



表 8.2-31　距离－波幅曲线的灵敏度
（摘自 GB 11345—1989）

灵敏度 DAC ＼ 检验级别 / 板厚/mm	A	B	C
	8～50	8～300	8～300
判废线	DAC	DAC－4 dB	DAC－2 dB
定量线	DAC－10 dB	DAC－10 dB	DAC－8 dB
评定线	DAC－16 dB	DAC－16 dB	DAC－14 dB

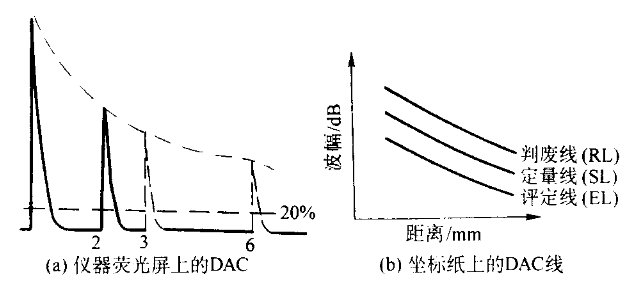


图 8.2-19　距离波幅曲线（DAC）

3.6　焊缝超声波探伤的一般程序

焊缝超声波探伤可分为探伤准备和现场探伤两个部分，其一般程序见图 8.2-20。

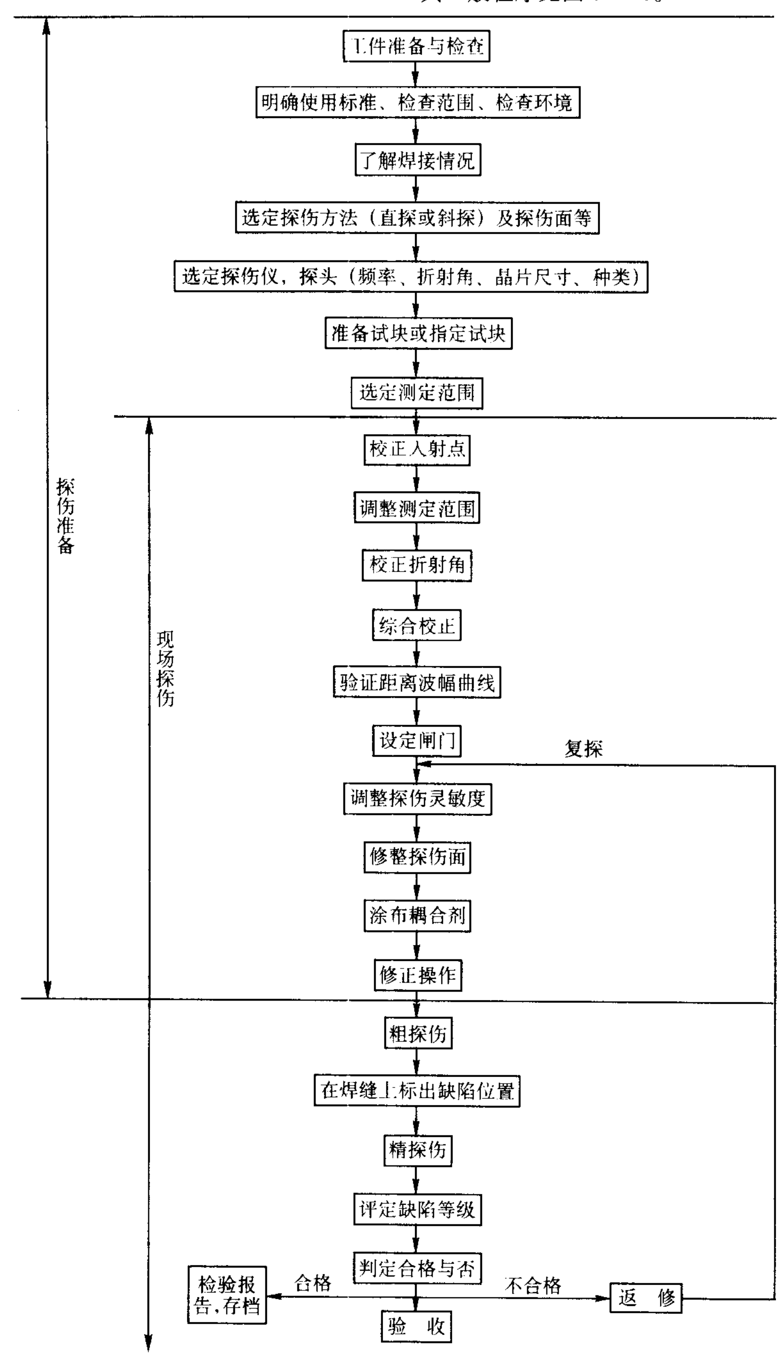


图 8.2-20　焊缝超声波探伤的一般程序



3.7　平板对接焊缝的超声波探伤

探伤前探伤人员应了解受检工件的材质、结构、厚度、曲率、坡口形式、焊接方法和焊接过程情况等资料。探伤灵敏度应调到不低于评定线。

探伤过程中，探头移动速度不大于 150 mm/s，相邻两次探头移动间隔至少有探头宽度 10% 的重叠。为了增加声束在水平方向视野，探头移动过程中还应做 10°～15°的转动。为了发现焊缝中的横向裂纹，B 级以上的检验还应使探头做平行或斜平行于焊缝的探测扫查。板厚大于 40 mm 的窄间隙焊缝，还应作串列扫查，以发现边界未熔合等垂直于表面的缺陷。探头扫查移动区的长度在直射法时应大于 $0.75P$，一次反射探伤法时应大于 $1.25P$。其中 $P=2T\times\tan\beta$，见图 8.2-21。

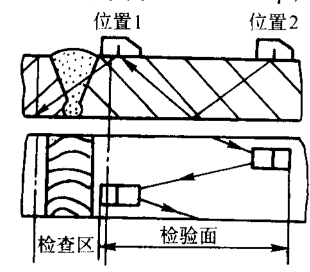


图 8.2-21　直射与一次反射探伤法示意图

为了确定缺陷的位置、方向和形状，应观察缺陷反射波的动态波形并区分是否是伪信号。在发现的缺陷波处可以采用前后、左右、转角和环绕等四种基本探头扫查方式（见图 8.2-22），完成测量操作。

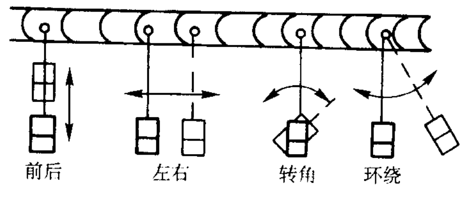


图 8.2-22　四种基本扫查方法

3.8　其他焊接结构的超声波探伤

除了平板对接焊缝外，其他结构焊缝的探伤应尽量采用平板焊缝检验中行之有效的各种方法。在选择探伤面和探头时应考虑到检测各种类型缺陷的可能性，并使波束尽可能垂直于焊缝中的主要缺陷。典型的探头形式见图 8.2-23。

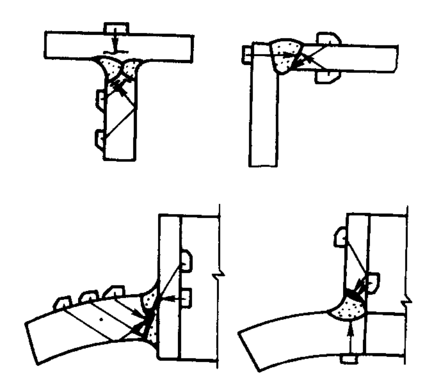


图 8.2-23　T 形、Γ 形和管座角焊缝的探伤面和探头形式

3.9　缺陷信号的特征及测量

在焊缝超声波探伤中，是通过对缺陷的反射信号进行分析评定，来确定焊接缺陷的尺寸、位置等参数的，其评定的准确性，直接影响焊缝的质量。因此，在对缺陷信号评定时应注意以下几点：应保证声速与缺陷相垂直以便获得最大反射；精确的判定缺陷的位置；了解产品的焊接方法和操作过程的稳定性；探头以不同角度环绕缺陷扫查，以便观察缺陷的静态和动态波形，从而确认缺陷的性质，其中典型缺陷的静动态波形见图 8.2-24。

缺陷的尺寸参数主要是指缺陷的波幅和其指示长度。缺陷指示长度主要有两种测量方法，当缺陷反射波只有一个高点或高点起伏小于 4 dB 时，采用降低 6 dB 相对灵敏度法测长（或称半波高法），见图 8.2-25a；当缺陷反射波峰起伏变化，含有多个高点时，采用端点峰值法测长，见图 8.2-25b。

3.10　缺陷的评定——GB/T 11345—1989 标准摘要

超过评定线的缺陷信号应注意其是否有裂纹等危害性缺陷的特征，如有怀疑应改变探头角度、增加探伤面、观察缺陷的动态波形、结合结构工艺特征作判定或补充其他检验方法作综合判定。

最大反射波幅超过定量线的缺陷应测量其指示长度，其值小于 10 mm 时，按 5 mm 计；相邻两缺陷各向间距小于 8 mm 时，两缺陷指示长度之和作为单个缺陷的指示长度。

最大反射波幅位于Ⅱ区（定量线以上）的缺陷，根据其指示长度按表 8.2-32 的规定予以评级。

最大反射波超过评定线的缺陷，检验者判定为裂纹等危害性缺陷时，无论其波幅和尺寸如何，均评定为Ⅳ级。

反射波幅超过判废线进入Ⅲ区的缺陷，无论其指示长度如何，均评定为Ⅳ级。

其他金属焊缝的超声波探伤：除了钢焊缝超声波探伤外，其他金属焊缝的探伤因声速和声阻抗不同，其探伤频率和探头角度也应不同。其他的探伤技术均可参照钢焊缝的探伤方法。常用的结构材料其声学特性见表 8.2-33。

3.11　国外焊缝超声波探伤标准

（1）欧洲 EN1714：1997 + A1：2002

该标准为焊缝的超声波探伤标准，规定了厚度大于等于 8 mm 的铁素体材料熔化焊全焊透焊接接头的手工超声波探伤的工艺方法。其主要内容如下。

1）探头频率　应为 2～5 MHz 并符合验收等级的规定。

2）声束入射角　横波检测时，声束入射角应在 35°～70°之间。采用 2 个以上探头时，应保证其中有 1 个探头的声束与焊缝熔合面垂直或尽可能垂直。

3）曲面探伤时的探头匹配　探头底面与检测面之间的间隙应小于 0.5 mm。对于圆筒或球形检测面要求：

$$D\geqslant 15a$$

式中，D 为工件直径，mm；a 为检测方向上的探头尺寸 mm。

如上述条件不能满足，应对探头底面进行修磨，使之与检测面相吻合。

4）时基范围与灵敏度的调整　每次检测前，应对超声波探伤仪进行时基范围和灵敏度调整，并每隔 4 h 进行校验，如发现有偏差，应按表 8.2-34 的要求进行校正。

5）基准高度

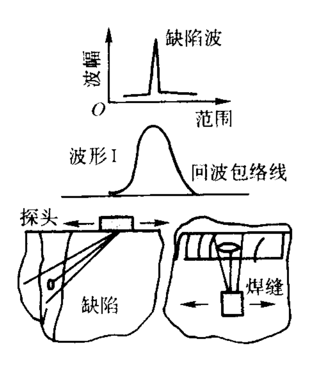
方法 1：用 ϕ3 mm 长横孔作距离 - 波幅曲线，以此作为基准高度。

方法 2：用表 8.2-35 和表 8.2-36 平底孔（KSR）的 AVG 曲线作为基准高度。

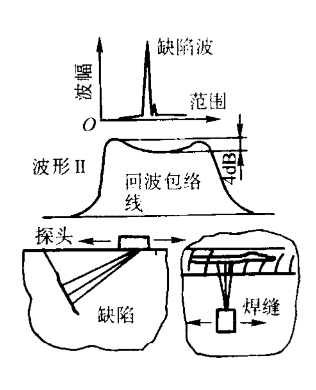
方法 3：用 1 mm 深矩形槽作距离 - 波幅曲线，以此作为基准高度。

串列探伤：$D_{KSR}=6$ mm（适用所有壁厚）。

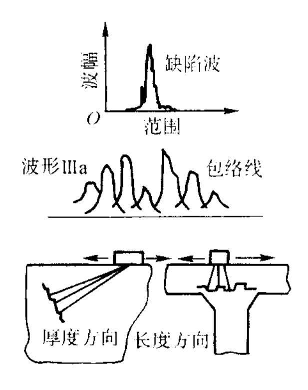




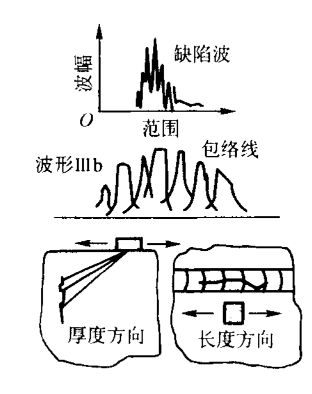
(a) 点状缺陷波峰窄,包络线光滑



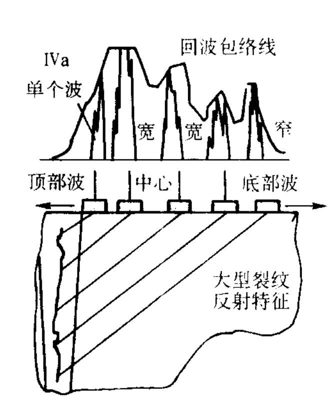
(b) 近平面缺陷波峰高,包络线宽



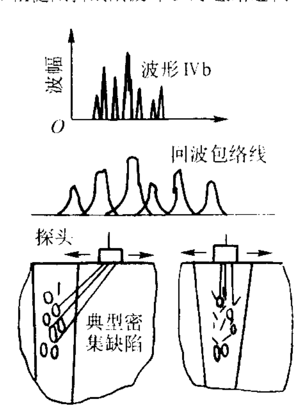
(c) 粗糙倾斜缺陷波峰多叉,包络起伏



(d) 粗糙垂直缺陷波峰宽,开叉多



(e) 粗糙表面大缺陷波峰宽而高,单个波峰窄



(f) 密集缺陷多个波集聚一起,波峰在包络线内滚动

图 8.2-24　典型缺陷静动态波型

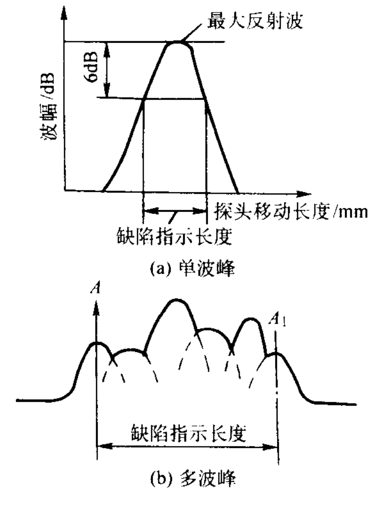


图 8.2-25　缺陷指示长度的测量方法

表 8.2-32　缺陷的等级分类

检验等级 / 板厚/mm / 评定等级	A	B	C
板厚/mm	8～50	8～300	8～300
Ⅰ	$2\delta/3$；最小 12	$\delta/3$；最小 10，最大 30	$\delta/3$；最小 10，最大 20
Ⅱ	$3\delta/4$；最小 12	$2\delta/3$；最小 12，最大 50	$\delta/2$；最小 10，最大 30
Ⅲ	$<\delta$；最小 20	$3\delta/4$；最小 16，最大 75	$2\delta/3$；最小 12，最大 50
Ⅳ	超过Ⅲ级者		

注：1. δ 为坡口加工侧母材板厚，母材厚度不同时，以较薄侧板厚为准。
2. 管座角焊缝 δ 为焊缝截面中心线高度。

表 8.2-33　各种材料密度、声速和声阻抗

材　料	密　度 /g·cm^{-3}	声　速/m·s^{-1} 纵波	声　速/m·s^{-1} 横波	声阻抗 /MPa·s·m^{-3}
铝	2.7	6 200	3 080	16.9
铝合金	2.79	6 320	3 130	17.1
钨	19.1	5 460	2 620	104.2



续表 8.2-33

材　料	密　度 /g·m^{-3}	声　速/m·s^{-1}		声阻抗 /MPa·s·m^{-3}
		纵波	横波	
铁	7.86	5 950	3 240	46.4
钢	7.8	5 870 ~ 5 950	3 190 ~ 3 260	45.8 ~ 46.4
铸铁	7.2	3 500 ~ 5 600	2 200 ~ 3 200	25 ~ 42
钛	4.58	5 900	2 960	27.4
铜	8.9	4 700	2 260	41.8
镍	8.8	5 630	2 960	49.5
铅	11.4	2 170	700	24.6
蒙乃尔合金	8.7	5 450	—	47.4
环氧树脂	1.15 ~ 1.3	2 500 ~ 2 800	1 100	2.8 ~ 3.7
聚氯乙烯	1.14	2 300	1 100	3.3

表 8.2-34　灵敏度与时基范围的校正

	灵　敏　度	
1	偏差≤4 dB	仪器须在连续检测前校正完
2	降低量 > 4 dB	仪器必须校正，所有此前的检测须重检
3	升高量 > 4 dB	仪器必须校正，所有检测记录显示须重新评定
	时　基　范　围	
1	偏差≤2%	仪器须在连续检测前校正完
2	偏差 > 2%	仪器必须校正，所有此前的检测须重检

6）观察极限　所有达到或超过下列极限值的显示都必须评定。

方法 1 和方法 3：基准高度 - 10 dB（33% DAC 折算比例）。

方法 2：基准高度 - 4 dB（根据表 8.2-35 和表 8.2-36）串列探伤：D_{KSR} = 6 mm（适用所有壁厚）。

表 8.2-35　方法 2（AVG）时横波斜探头的基准高度

探头频率 /MHz	母材厚度/mm		
	8≤t≤15	15≤t≤40	40≤t≤100
1.2 ~ 2.5	—	D_{KSR} = 2	D_{KSR} = 3
3 ~ 5	D_{KSR} = 1	D_{KSR} = 1.5	—

表 8.2-36　方法 2（AVG）时纵波直探头的基准高度

探头频率 /MHz	母材厚度/mm		
	8≤t≤15	15≤t≤40	40≤t≤100
1.2 ~ 2.5	—	D_{KSR} = 2	D_{KSR} = 3
3 ~ 5	D_{KSR} = 2	D_{KSR} = 2	D_{KSR} = 3

7）显示定位　在每个检测面都应确定一个基准点，并使检测区域内的所有记录显示都反映在一个坐标系中，如图 8.2-26 所示。

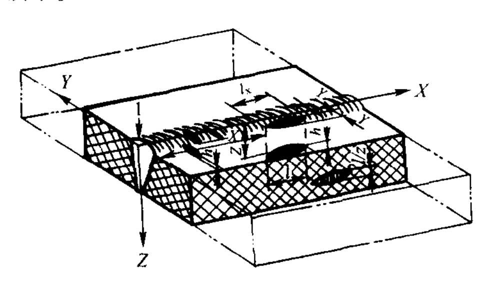


图 8.2-26　确定显示位置的坐标系

1—基准点；l—显示的长度；h—显示的高度；z—显示在深度上的位置；x—显示在纵向的位置；y—显示在横向的位置；l_x—显示的纵向长度；l_y—显示的横向长度；l_z—显示在深度上的长度

8）检验等级　在附录 A 中以图表的形式给出了七种不同焊接接头类型的检验等级要求，包括检测位置、检测面宽度、入射角度和数量等，其中板和管对接接头的检验等级要求如图 8.2-27 和表 8.2-37 所示。

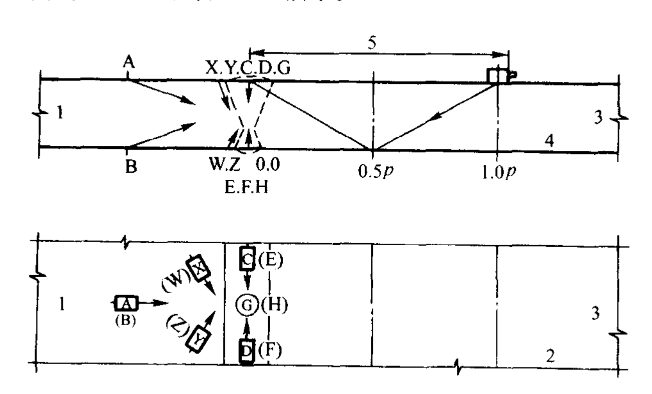


图 8.2-27　板和管对接接头的超声波探伤

1—正面；2—视图；3—反面；4—侧视图；5—同跨距 p 有关的被检测面宽度（P_{fb}）

表 8.2-37　板和管的对接焊缝

检验等级	母材厚度 /mm	纵向显示						横向显示			
		要求的数量				总的入射数量	备注	要求数量		总的入射数量	备注
		入射角度	探头位置	被检表面宽度（P_{fb}）	探头位置			入射角度	探头位置		
		L—探伤			N—探伤			T—探伤			
A	8≤t<15	1	A 或 B	1.25p	—	2	①	1	（X 和 Y）或（W 和 Z）	4	③
	15≤t<40	1	A 或 B	1.25p	—	2	①	1	（X 和 Y）或（W 和 Z）	4	③
B	8≤t<15	1	A 或 B	1.25p	—	2	⑤	1	（X 和 Y）或（W 和 Z）	4	③
	15≤t<40	2⑥	A 或 B	1.25p	—	4	②⑤	1	（X 和 Y）或（W 和 Z）	4	③
	40≤t<60	2	A 或 B	1.25p	—	4	②	2	（X 和 Y）或（W 和 Z）	8	③
	60≤t<100	2	A 或 B	1.25p	—	4	②	2	（C 和 D）或（E 和 F）	4	③④
C	8≤t<15	1	A 或 B	1.25p	G 或 H	3	④	1	（C 和 D）或（E 和 F）	2	④
	15≤t<40	2	A 或 B	1.25p	G 或 H	5	②④	2	（C 和 D）或（E 和 F）	4	④
	>40	2	A 或 B	1.25p	G 或 H	5	②④	2	（C 和 D）或（E 和 F）	4	④

① 经商定可降低为1侧的1种入射位置。
② 经特殊商定的采用串列探伤技术的附加探伤。
③ 只有在特殊商定下才要求。
④ 盖面层加工状态符合第8节的要求，如必要可将焊缝打磨，如果环缝可只打磨外表面盖面层。
⑤ 如只能探1侧，必须采用2种入射角度。
⑥ 厚度在 15≤t<25 时，采用1种入射角度就可以，但前提是探头 频率要小于3 MHz。
⑦ L—探伤：斜探头探纵向显示；N—探伤：直探头探伤；T—探伤：斜探头探横向显示；P—跨距；P_{fb}—被检表面宽度。

（2）欧洲 EN1712：1997+A1：2002 标准

该标准规定了 8~100 mm 铁素体焊缝超声波探伤的合格极限，是进行超声波显示评定的标准。

方法1和方法3的合格极限2和3见图 8.2-28 和表 8.2-38。

方法2的合格极限2和3见图 8.2-29 和表 8.2-39。

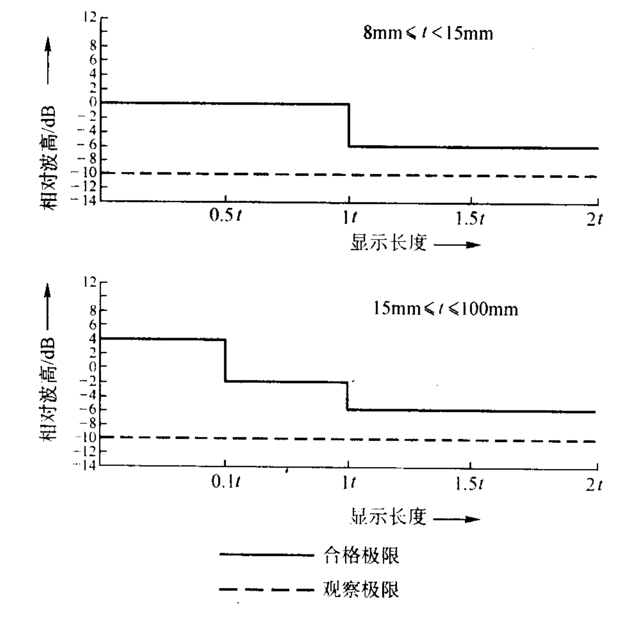


图 8.2-28　采用方法1和3时的合格极限2和3

基准高度：0 dB 见表 8.2-35 和表 8.2-36

记录极限：合格极限2=基准高度-6 dB（50% DAC）

合格极限3=基准高度-2 dB（80% DAC）

表 8.2-38　采用方法1和3时的合格极限2和3

显示长度 l/mm	最大允许波高
8 mm≤t<15 mm	
l≤t	基准波高
l>t	基准波高-6 dB
15 mm≤t≤100 mm	
l≤0.5t	基准波高+4 dB
0.5t<l≤t	基准波高-2 dB
l>t	基准波高-6 dB

合格极限：基准波高-10 dB

记录极限：合格极限2=基准高度-6 dB

　　　　　合格极限3=基准高度-2 dB

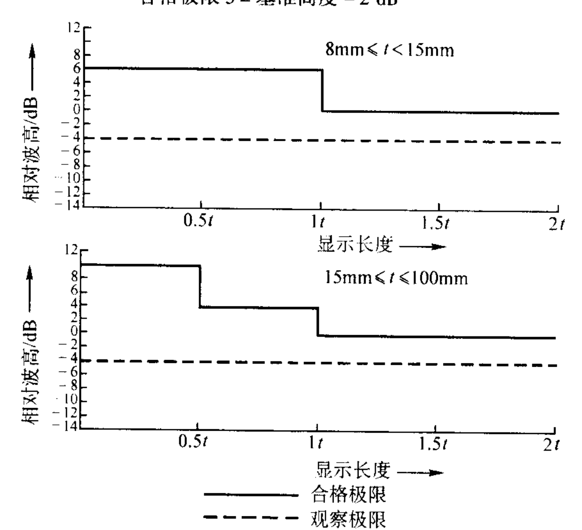


图 8.2-29　采用方法1和3时的合格极限2和3

基准高度：0 dB 见表 8.2-35 和表 8.2-36

记录极限：合格极限2=基准高度

合格极限3=基准高度+4 dB



表 8.2-39　采用方法 2 时的合格极限 2 和 3

8 mm≤t<15 mm	
显示长度 l/mm	最大允许波高
$l≤t$	基准波高 + 6 dB
$l>t$	基准波高
15 mm≤t≤100 mm	
显示长度 l/mm	最大允许波高
$l≤0.5t$	基准波高 + 10 dB
$0.5t<l≤t$	基准波高 + 4 dB
$l>t$	基准波高

合格极限：基准波高 - 4 dB
记录极限：合格极限 2 = 基准高度
　　　　　合格极限 3 = 基准高度 + 4 dB

3.12　超声波探伤工艺卡

超声波探伤工艺卡是指导操作人员对具体产品进行超声波探伤的工艺性文件，多以图表为主，见表 8.2-40。

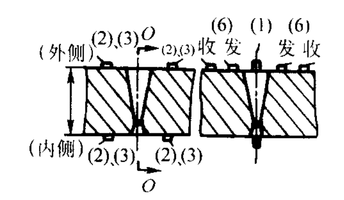
3.13　焊缝超声波探伤的新进展

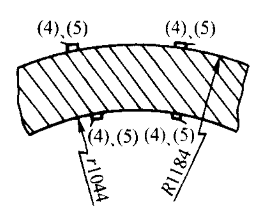
过去十几年来超声波检测的进展很快，特别是在换能器、自动化和缺陷图像显示方面有了实质性的进步。

在换能器方面，相控阵探头和电磁声探头已经达到工程应用阶段，并有商品出售。其中相控阵探头是采用多个单元压电晶片按照一定规则排列，通过脉冲延迟触发所产生的不同相位干涉，来调节声束的角度或聚焦状态，从而达到全面快速检测目的的探头。它具有声束角度可控，可动态聚焦的特点。压电晶片阵列按组成一般分线阵、方阵、环阵三种模式（见图 8.2-30）。典型相控阵探头的波束摆动见图 8.2-31。采用磁铁与高频电流线圈组成的电磁声探头，具有不需要耦合液即可以传递声脉冲，探伤过程不需要与工件表面紧密接触，并可以按照相控阵原理摆动波束以及产生水平极化横波等特点。典型的电磁声探头见图 8.2-32。

表 8.2-40　超声波探伤工艺卡示例

工程（令）号	N30 - 1 - PZ6	图（炉）号	PN2、PZ3	工件名称	筒体主焊缝
母材牌号	18MnMoNb	热处理状态	—	焊接种类	内手工焊、外自动焊
仪器型号	CTS - 22、JTS - 5	探测面状态	抛磨平滑	耦合剂	机油
探测时期	焊后 24 h 后	验收标准	NFS2 - 82 - Ⅱ	探测人员资格	Ⅱ级





共 20 个探测方向。Φ：平孔　ϕ：横孔　B：大平底　Bc：曲底面　U：槽

序号	1		2	3	4		5		6
探头种类	直探头		K1	K2	K1		K2		两 K1
探测频率/MHz	2.5		2.5	2.5	2.5		2.5		2.5
晶片尺寸/mm	ϕ20		14×16	14×16	14×16		14×16		14×16
参考反射体	Bc		ϕ3	ϕ3	ϕ3		ϕ3		B
反射体深度/mm	140		90	90	90		90		140
调节/dB	34	36	22	18	26	24	24	20	32
参考波高/%	40		40	40	40		40		40
表面补偿/dB	0		2	2	4		4		0
探测/dB	0		0	0	0		0		0
探测面	外圆	内圆	内、外圆	内、外圆	外圆	内圆	外圆	内圆	外圆
探测方向、深度	2、140		4、140	4、90	2、D150	2、d140	2、d110	2、D80	2、140
探测比例/%	100		100	100	100		100		100

探测条件序号	定量线			测长线			判废线			判废长度/mm	
	纵向	横向		纵向	横向		纵向	横向		纵向	横向
1			ϕ4			ϕ2			ϕ5		
2	ϕ3 - 10 dB			ϕ3 - 16 dB			ϕ3			≥15	
3	ϕ3 - 10 dB			ϕ3 - 16 dB			ϕ3			≥15	
4		ϕ3 - 10 dB			ϕ3 - 16 dB			ϕ3			≥15
5		ϕ3 - 10 dB			ϕ3 - 16 dB			ϕ3			≥15
6						ϕ2			ϕ5		

备注：周向探测缺陷时，应按曲面定位修正表 8.2-41 对缺陷进行定位

单位：×××	编制：×××	审核：×××	批准：×××	日期：×××

表 8.2-41　曲面定位修正表

d		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
K1	L	10	20	31	41	52	63	74	85	97	109	120	133	145	157	170
	H	10	20	30	39	49	58	68	77	86	95	104	113	122	131	139
	l	10	20	29	38	48	57	65	74	82	91	99	107	115	123	
	h	10	20	30	41	51	62	72	83	94	104	115	126	137	150	
K2	L	20	41	61	82	104	126	148	170	192	215	238				
	H	9	19	28	37	46	54	61	68	75	82	88				
	l	20	39	58	77	95	113	130	147							
	h	10	21	32	43	55	67	79	91							

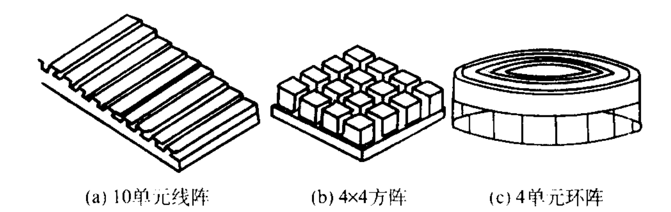
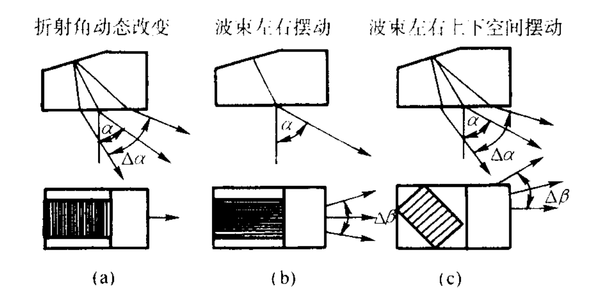

(a) 10单元线阵　(b) 4×4方阵　(c) 4单元环阵

图 8.2-30　典型压电元件阵列模式



(a)　(b)　(c)

图 8.2-31　晶片线性排列相控阵探头不同波束摆动形态的示意图

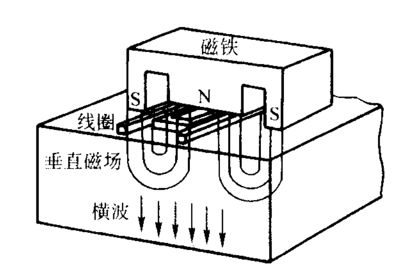
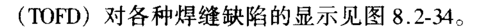
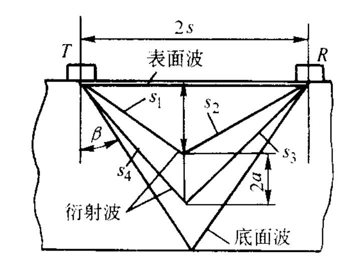


图 8.2-32　电磁声探头产生超声横波原理

超声检测技术中的另一进展是衍射时差法（TOFD），它是利用缺陷端部的衍射波传播时间来进行缺陷定量的方法。一般采用两个纵波斜探头作为发射与接收探头分别放置在缺陷左右两侧，利用发射的纵波会在缺陷的上下边缘处产生微弱的衍射波且能被接收探头所接收，形成缺陷上下端的衍射波信号，从而测出衍射波的传播时间，并由 D 型显示（焊缝纵截面显示）来表示，就可以进行缺陷的定位、定量和定性评价，其原理见图 8.2-33。因为缺陷的衍射波信号先到达接收探头处，因此很容易区分出真正的缺陷波。测量出缺陷上下端点衍射波的时间差就可以直接计算出缺陷的自身高度，精度可达 0.5～1.0 mm。其最大的特点是不需要事先校准，从而摆脱了脉冲反射法探伤中缺陷波幅与其尺寸无线性对应关系的缺点及反复校准参数的困难。衍射时差法


（TOFD）对各种焊缝缺陷的显示见图 8.2-34。



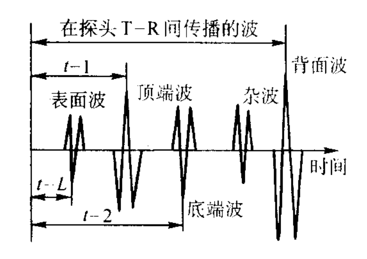


图 8.2-33　衍射时差法（TOFD）原理和 A 扫描图形
T—发射探头；R—接收探头；
S—探头间距离的 1/2；β—纵波折射角

在探伤过程自动化领域中，随着缺陷信号采集系统与计算机功能的提高以及机械系统的优化，目前已经走出试验室，广泛地应用到核能与石油化工等工程检验中。其特点如下。

1）缺陷检出率与手工探伤方法相当，但排除了人为因素干扰，重复性提高。

2）可以采用先进的数据采集与处理技术，使缺陷尺寸的测量更加准确，例如衍射波法、聚焦波法、人工合成聚焦波法、相控阵列探头和串列探头探伤法等都可以在自动探伤系统中实现。

3）可以工作在恶劣环境中，例如核辐射与深海环境，长距离地下石油天然气输送管道的检测等。

一般自动超声探伤系统包括硬件与软件两部分。硬件部分由自动扫查器，控制计算机以及与计算机通信的各种接口卡等构成，例如超声波发射接收卡与缺陷数据采集卡、电动机控制卡与驱动器等，见图 8.2-35。软件由实时控制、数据采集、图像处理与缺陷显示等组成。工件探伤前事先把探伤参数输入计算机，全部探伤完成后再把探伤过程采集的缺陷数据结合探伤参数（如折射角与声速等）重新调出，对其做进一步地分析与处理，并能得到焊缝缺陷的三维彩色投影图像如图 8.2-36 所示（*C* 为俯视图、*B* 为侧视图与 *D* 为主视图），使探伤结果更准确，并便于分析与判定。



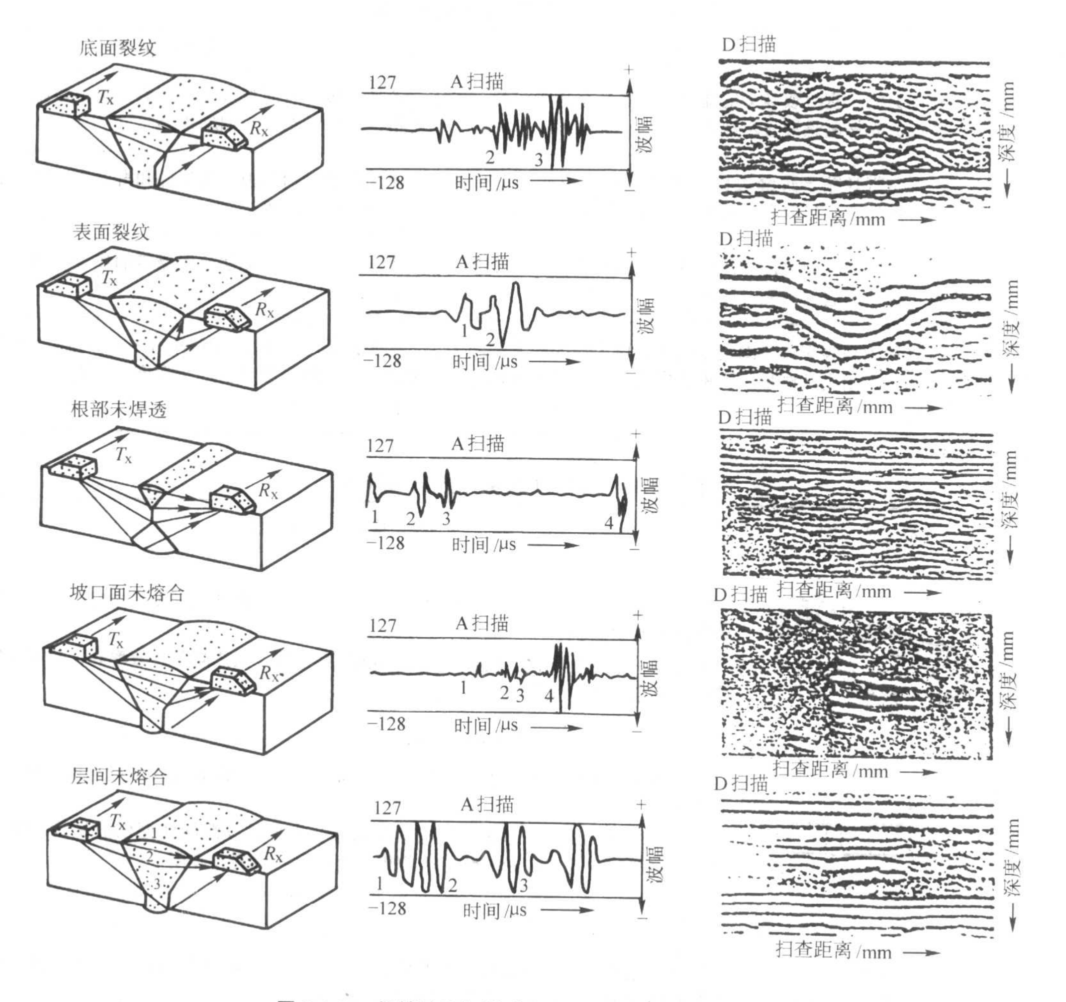


图 8.2-34　焊缝缺陷衍射时差法（TOFD）探伤记录图例
（A 型显示和 D 型显示）

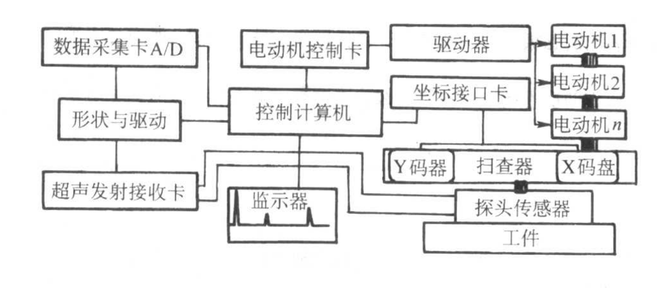
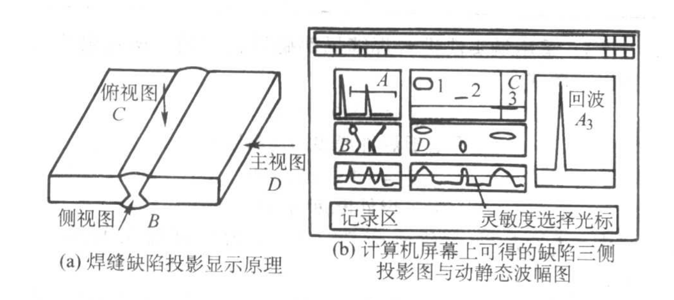


图 8.2-35　自动探伤系统硬件结构示意图



(a) 焊缝缺陷投影显示原理　(b) 计算机屏幕上可得的缺陷三侧投影图与动静态波幅图

图 8.2-36　投影扫描缺陷图像显示原理

4　焊缝的磁性探伤

焊缝的磁性探伤主要适用于检验铁磁性材料焊缝的表面与近表面缺陷，例如碳钢或低合金钢表面的焊接裂纹、疲劳裂纹与应力腐蚀裂纹等。

4.1　磁性探伤的原理与分类

焊缝的磁性探伤是利用铁磁性材料表面与近表面缺陷会引起磁导率发生变化，在磁化时将在表面上产生漏磁场，并采用磁粉、磁带或其他磁场测量方式来记录与显示缺陷的一种方法。目前，磁性探伤的主要方法是磁粉探伤，近来也发展了一些其他类型的磁性探伤方法（见表 8.2-42）。

4.2　磁化方法和规范

进行磁粉探伤时，首先应磁化构件的待检区，磁化时可采用交流、直流、脉动电流等，并保持磁场方向与缺陷方向尽量地垂直。由于交流有趋肤效应，一般适合于探测表面缺陷（最大深度约 2 ~ 3 mm），直流磁场渗透较深可检测表面与近表面缺陷（最大深度达 5 ~ 8 mm）。采用的磁化方法应与被检查的结构和焊缝相匹配，各种方法的特点与适用范围见表 8.2-43。

磁化规范的选择直接影响磁粉探伤的灵敏度和出现伪缺陷的多少，最佳磁场强度一般位于磁滞曲线的拐弯处。具体磁化规范选择可参考下列计算方法。

表 8.2-42　焊缝磁性探伤方法的分类

方法类型	原　理	适用范围
磁粉显示磁场	利用交流、直流或脉动电流磁化焊缝，采用干磁粉、磁悬液或荧光粉磁悬液显示缺陷	各种焊缝的表面与近表面缺陷，例如核设施、石油化工设备、造船、车辆、钢结构等
磁带录取磁场	采用磁带紧贴于焊缝表面，记录下缺陷引起的漏磁信号，再用探测头提取和显示磁带上的缺陷信号	无法涂敷磁粉与观察的工件和自动磁性探伤的场合，例如锅炉管间焊缝等
霍尔元件测漏磁场	利用霍尔元件的输出电压比例于漏磁场的磁感应强度 B 来测量缺陷引起的漏磁，显示缺陷	无法施加磁粉并无法放置磁带的场合，例如管道内壁的检查等
线圈测量交流电磁场	首先利用高频交流线圈在焊缝表面以上空间激发起均匀电磁场，采用交叉测量线圈检测裂纹引起的磁场变形为显示缺陷	探头距焊缝表面的间隙可达 5～10 mm，减少表面清理要求，并能测量裂纹长度与深度。特别适用于水下钢结构的检验

表 8.2-43　焊接件的磁化方法与特点

磁化方法	示　意　图	特点与适用范围
通电法		将工件夹于探伤机的两接触板之间，电流从工件上通过，形成周向磁场。可检测与电流方向平行的焊接缺陷 工件可一次通电磁化，其长度与所需电流值无关，工艺简单，效率高，检测灵敏度高，但接触不良会产生电弧烧伤
线圈法		在线圈中形成纵向磁场，易发现工件周向缺陷。可检测管或管节点与接管角焊缝上的纵向裂纹 采用电缆环绕工件较方便，但在工件端部会出现磁场泄漏使探伤灵敏度下降。故在端部区，最好采用含有“快断电路”的磁化系统以保持检测灵敏度
触头法		用支杆触头接触工件表面，电流从支杆导入工件。适于焊缝或大型工件的局部检验。缺点是存在电接触点，易产生火花，烧损工件表面 通过触头位置的摆放可改变磁场方向，可检测焊缝表面的纵向与横向裂纹
磁轭法		由磁轭或永久磁铁将焊缝表面两磁极间的区域磁化，设备轻便，易于携带，既适合于平面焊缝也适合于角焊缝 为检查纵向与横向缺陷，应作两次不同方向磁化，检验速度慢。磁极与工件表面接触不良会影响探伤灵敏度
旋转磁场法		工件表面磁场方向连续改变，呈旋转规律。一次可检测出焊缝表面上任意方向的缺陷，检测速度快。适于探测平面焊缝结构

1）采用通电法进行焊缝的整体磁化时，磁化电流值可用下式求得：

$$I = HD/320$$

式中，I 为磁化电流值，A；D 为焊接件的等效直径，mm；H 为磁场强度，A/mm，可在 2.4～4.8 A/mm 之间选用。

2）采用电缆缠绕线圈以纵向磁化法检验管道环焊缝时，磁化电流可由下式求得：

$$NI = 35\,000/(L/D + 2)$$

式中，N 为线圈匝数；I 为磁化电流值，A；L 为管道长度，mm；D 为管道直径，mm；L/D 为长径比，$L/D < 3$ 时，此式不适用，$L/D > 15$ 时，取 15。

3）采用触头法进行焊缝局部磁性检验时，磁化电流可用以下两式求得：

$$I_1 = (3.5 \sim 4.5)S$$

（适用于焊件厚度 $\delta \leqslant 19$ mm）；

$$I_2 = (4.0 \sim 5.0)S$$

（适用于焊件厚度 $\delta > 19$ mm）。

式中，I_1、I_2 为磁化电流值，A；S 为支杆触头间距离，mm。

4）采用磁轭法局部磁化检验焊缝时，可利用交流、直流电磁或永久磁铁轭。当电磁轭的极间距为 200 mm 时，交流电磁轭的提升力最小为 44 N，直流电磁轭或永久磁铁轭的



提升力最小为 177 N。

4.3　磁粉探伤设备

磁粉探伤设备种类很多，通常按其使用方法分为固定式、移动式和便携式三类，部分探伤设备的主要技术参数见表 8.2-44。

4.4　磁粉及磁悬液

磁粉探伤过程采用磁粉作为显示介质，目前有荧光与非荧光磁粉两大类。在紫外线照射下荧光磁粉发现黄绿色荧光，可提高探伤灵敏度。非荧光磁粉一般有黑色与红色等多种类型。磁粉的主要性能指标见表 8.2-45。将磁粉放入水或油介质中且其呈分散悬浮状态的混合液体称为磁悬液。对磁悬液的一般要求见表 8.2-46，其中油剂用于有油脂污染的焊缝探伤，水剂则用于清洁表面或有防火要求的场合。磁悬液浓度一般为：非荧光磁粉 10 ~ 25 g/L；荧光磁粉 1 ~ 2 g/L。其检测方法为：第一，将磁悬液连续搅拌 5 min 以上，取 100 mL 样品放入沉淀瓶；第二，在瓶中沉淀 60 min；第三，读出磁粉沉淀高度值，即为体积百分比含量，并可算出质量百分比含量。

表 8.2-44　磁粉探伤设备的特点和型号及主要技术参数

类型	特点	用途	主要参数 / 设备型号	周向磁化电流 /A	纵向磁化电流 /A	夹头间距 /mm	外形尺寸 /mm	质量 /kg
固定式	固定场所安装使用，尺寸质量大，检测功能全	用于需较大磁化电流的可移动的中小焊接工件	CJW - 2000C	0 ~ 2000	0 ~ 12000	0 ~ 800	2380 × 720 × 2020	1 100
			CEW - 4000C	0 ~ 4000	0 ~ 22000	0 ~ 1500	3180 × 860 × 2020	1 800
移动式	可进行自由移动，尺寸和质量小于固定式	可用于小型焊接件或不易移动的大型工件	主要参数 / 设备型号	磁化方式	输出交流 /A	输出直流 /A	外形尺寸 /mm	质量 /kg
			CED - 2000A	交直流	0 ~ 2000	0 ~ 1000	360 × 480 × 580	38
			CED - 5000A	交直流	0 ~ 5000	0 ~ 3000	460 × 620 × 880	110
便携式	体积小，质量轻，移动方便	适用于野外、高空等现场及压力容器的局部焊缝探伤	主要参数 / 设备型号	磁化电流 /A	外形尺寸 /mm	质量 /kg		
			支杆型 CY - 500	0 ~ 500	150 × 270 × 200	6.5		
			主要参数 / 设备型号	工作电压 /V	极距 /mm	提升力 /kg	外形尺寸 /mm	质量 /kg
			电磁轭型 TWM 220	AC220	105 ~ 285	17	268 × 168 × 50	3.2
			主要参数 / 设备型号	工作电压 /V	激磁安匝数	提升力 /kg	磁化有效范围 /mm	速度 /（m/min）
			交叉磁轭 CXX - 1	36 ± 2.5	3000	140	ϕ100	6

表 8.2-45　磁粉的主要性能指标

主要性能	要求指标
磁粉粒度	磁粉的粒度应不小于 0.071 mm，一般在 1 ~ 25 μm，干粉法磁粉为 5 ~ 150 μm
磁粉密度/$g \cdot cm^{-3}$	干粉法用纯铁粉的密度为 8，湿法用氧化铁粉密度为 4.5
磁粉形状	足够的球状颗粒与高比例的条状颗粒组成，具有良好的活动性
磁　性	高磁导率和低剩磁性质，且不应互相吸引，其磁性称量值应大于 7 g，干法磁性称量值应在 15 g 以上
活动性	磁粉应能在探伤表面移动，有较好的活动性，以便为漏磁场吸附
对比度	磁粉应与试件表面有良好的对比度和识别力，湿粉法易采用黑色、红色荧光磁粉，干粉法还可以采用黄色磁粉

表 8.2-46　对磁悬液的性能要求

悬浮液种类	性能要求
油剂	1）低黏度，在 38℃时不应超过 5×10^{-6} m²/s 2）高闪点，最低为 60℃ 3）如果使用荧光磁粉，要求油的固有荧光低，即不应干扰荧光磁粉的有效性 4）不起化学反应，以免减少悬浮的磁粉，并且无臭味



续表 8.2-46

悬浮液种类	性能要求
含有添加剂的水	1）有良好的湿润性与分散性，并且无泡沫以免干扰磁痕的形成 2）无腐蚀性，不应腐蚀被检验的装置 3）低黏度，在38℃时不应超过 5×10^{-6} m²/s 4）使用荧光磁粉时，不应有荧光 5）呈碱性，但pH值不应超过10.6 6）无臭味，不起化学反应，不应造成磁悬液变质

4.5 磁粉探伤灵敏度试片（块）

焊缝磁粉探伤过程中，为了验证磁化方法和规范是否合适及有效检测区是否达到要求，应采用灵敏度试片进行测定。表8.2-47给出了常用磁粉探伤灵敏度试片（块）的参数，图8.2-37表示出常用磁粉探伤灵敏度试片（块）的结构。

表 8.2-47 常用磁粉探伤灵敏度试片（块）参数

试片（块）型号	人工缺陷基本参数	主要用途
A型 GB/T 15822—1995	试片厚度：100 μm 人工缺陷槽深：15 μm、30 μm、60 μm三种	检查探伤装置、磁粉、磁悬液综合性能及磁场方向、探伤有效范围等
B型 GB/T 15822—1995	孔径：ϕ1.0 mm 孔深为1 mm、2 mm、3 mm、4 mm四种	检查探伤装置、磁粉、磁悬液综合性能
C型 JB/T 6065—1992	试片厚度：50 μm 人工缺陷槽深：8 μm	几何尺寸小，可用于窄小部位，功能同A型试片
直流标准环形试块（B型） JB/T 6066—1992	孔径ϕ1.78 mm的12个人工通孔，孔到试块外圆表面距离在1.78～21.34 mm范围内	检查直流电或整流电连续法磁化时，探伤装置、磁粉、磁悬液的综合性能与灵敏度
交流标准环形试块（E型） JB/T 6066—1992	铜棒、钢环和胶木衬垫三部分组成，3个ϕ1 mm通孔分别距钢环外圆1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm	检查交流磁化时，探伤装置、磁粉、磁悬液的综合性能与灵敏度
ASME SE709板型	槽深：5～50 μm 槽宽：5 μm±1 μm	用来估价磁粉性能，灵敏度或整个系统性能
ASME SE709环型	孔径：ϕ0.7 mm 孔深：(0.07～0.84)×25.4 mm	比较磁粉性能、灵敏度及全面性能

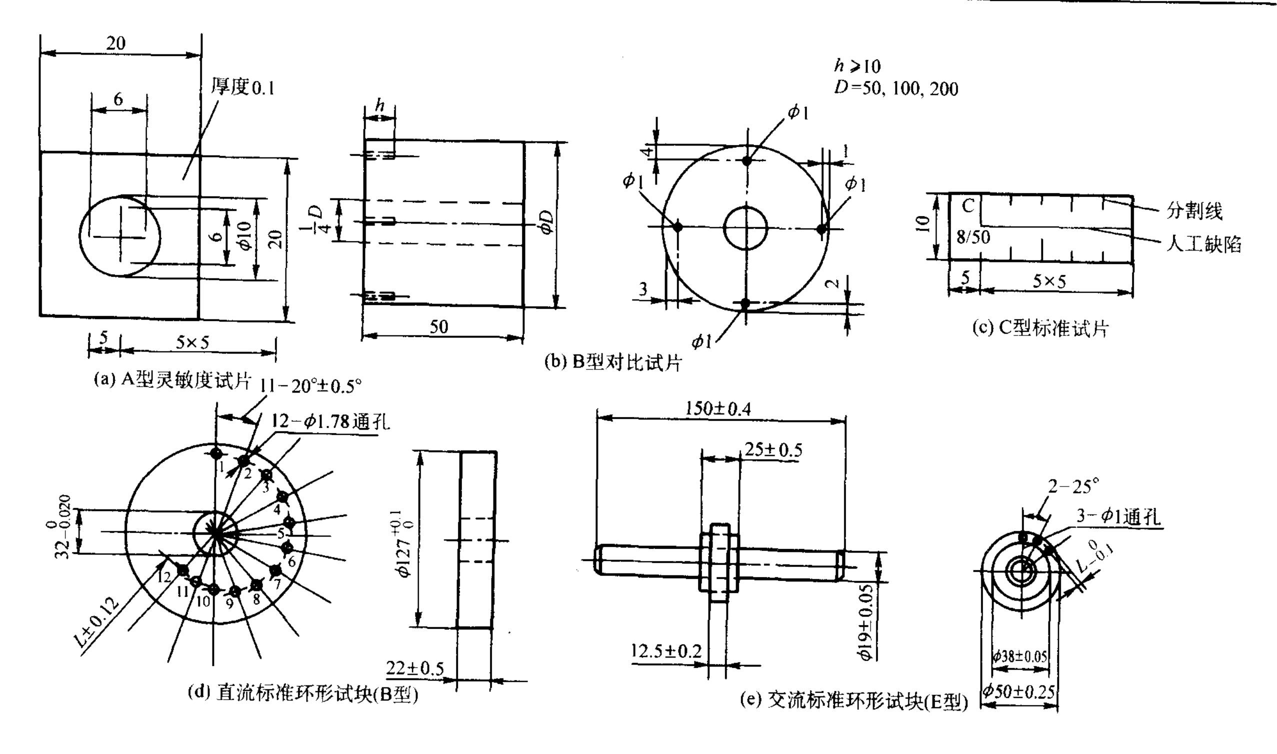


图 8.2-37 常用磁粉探伤灵敏度试片结构



4.6　缺陷引起的漏磁场

由于缺陷磁阻高，因而当工件被磁化时便在缺陷存在部位产生漏磁场。缺陷自身深度、宽度、倾角以及缺陷的埋藏深度都会对漏磁场的强度产生影响。

一般来说，缺陷深度和宽度方向的尺寸越大其漏磁场也越大。缺陷埋藏深度愈深和其与表面法线间夹角愈大，漏磁场愈小。图 8.2-38 ~ 图 8.2-41 分别表示了缺陷引起的漏磁场与其自身深度、宽度、埋藏深度与倾角间的关系（采用试件上人工缺口的测量值）。

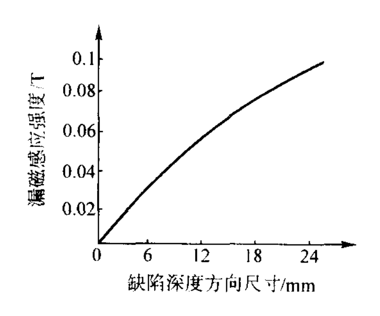


图 8.2-38　缺陷自身深度方向尺寸与其漏磁场间的关系

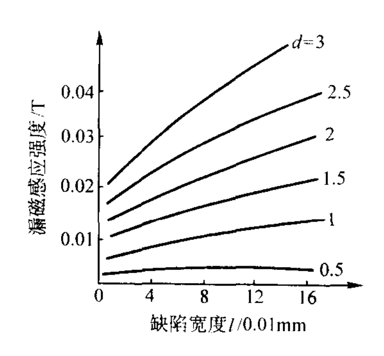


图 8.2-39　缺陷宽度与其漏磁场间的关系

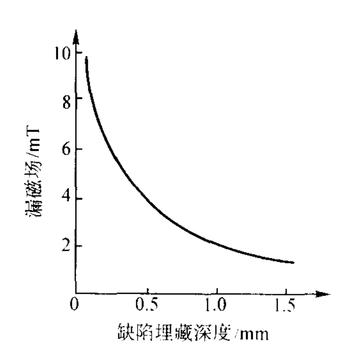


图 8.2-40　缺陷埋藏深度对其漏磁场的影响

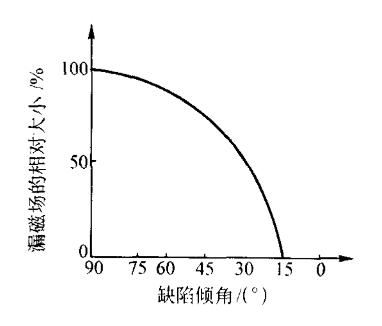


图 8.2-41　缺陷倾角与其漏磁场的关系

4.7　磁粉探伤的操作程序

焊缝磁粉探伤的检验方法分为连续法和剩磁法，其操作程序一般包括预处理、磁化、施加磁粉、磁痕的观察、记录、退磁、后处理等。各项操作程序和要点见图 8.2-42 和表 8.2-48。

4.8　磁痕的观察与评定

焊缝磁痕根据其所处位置、外观形状与焊件材质等因素，一般可分为三类，见表 8.2-49。根据磁痕的长轴和短轴之比，小于 3 mm 的缺陷磁痕为圆形，大于等于 3 mm 的缺陷磁痕为线型。

表 8.2-48　焊缝磁粉探伤工艺摘要

项　目	工　艺　要　点
预处理	清理焊缝及附近母材，如去除焊缝表面污垢、焊接飞溅物、松散的铁锈与氧化皮、厚度较大的各种覆盖层 使用干磁粉时，或者使用与清洗液性质不同的磁悬液时，必须等焊缝表面干燥后才能进行检验
磁　化	焊缝检验区应在两个互相垂直的方向分别各磁化一次，一般采用连续磁化法，一次通电时间 1 ~ 3 s，其磁化规范采用标准推荐值或符合标准要求的灵敏度试片测定 采用旋转磁场磁化时，移动速度不大于 3 m/min；采用触头法磁化时，触头间距为 75 ~ 200 mm；采用磁轭法的磁极间距为 50 ~ 200 mm 易产生冷裂纹的焊接结构不允许采用触头不检验
施加磁粉	湿法：在磁化过程中施加磁悬液，伴随液体流动带动磁粉在漏磁场处形成磁粉堆积即磁痕 干法：均匀地施加磁粉，利用柔和气流使其流动，促使在漏磁场上形成磁痕
磁痕的观察	非荧光磁粉的痕迹在白光下观察，光强应不小于 1 000 lx；荧光磁粉的痕迹在白光下不大于 20 lx 的暗环境中采用紫外线灯照射观察，紫外线灯的亮度在距灯 400 mm 处应不低于 1 000 $\mu W/cm^2$，可借助于 2 ~ 10 倍的放大镜观察
记　录	可采用照相法、胶带纸粘贴复制法等记录
退　磁	当剩磁会影响焊件的后加工工序、使用性能、周围设备或仪表时应进行退磁
后处理	应将工件表面的磁粉及反差增强剂清除，对使用水磁悬液检验后的工件表面进行防锈处理



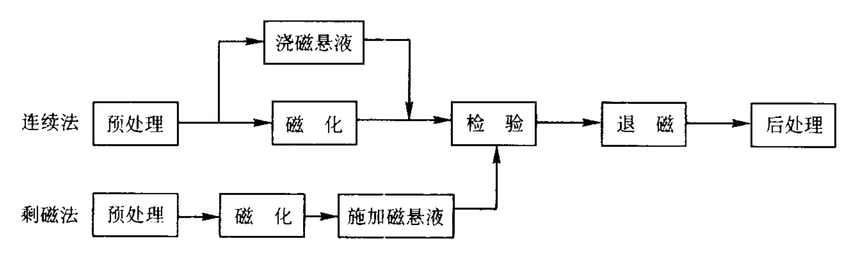


图 8.2-42　磁粉探伤的一般操作程序

表 8.2-49　磁粉痕的分类

磁痕类别	磁 痕 特 征	产 生 原 因
表面缺陷	磁痕尖锐、轮廓清晰、磁粉附着紧密	冷裂纹、火口裂纹、应力腐蚀裂纹、未熔合等
近表面缺陷	磁痕宽而不尖锐，采用直流或半波整流磁化效果好	焊道下裂纹、非金属夹渣等
伪缺陷	磁痕模糊，退磁后复检会消除	有杂散磁场、磁化电流过大等

焊缝磁痕可按 JB/T 6061—1992《焊缝磁粉检验方法和缺陷磁痕的分级》标准的规定进行评级，见表 8.2-50，或参考其他各专业标准的规定。对发现并可判定的表面与近表面裂纹和超标缺陷应打磨消除，打磨过深应补焊到与表面相同。

表 8.2-50　缺陷磁痕分级表

质量等级		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
不考虑的最大缺陷显示痕迹/mm 缺陷显示痕迹的类型及缺陷性质		≤0.3	≤1	≤1.5	≤1.5
线形缺陷	裂纹	不允许	不允许	不允许	不允许
线形缺陷	未焊透	不允许	不允许	允许存在的单个缺陷显示痕迹长度≤0.15δ，且≤2.5 mm 100 mm 焊缝长度范围内允许存在的缺陷显示痕迹总长≤25 mm	允许存在的单个缺陷显示痕迹长度≤0.2δ，且≤3.5 mm 100 mm 焊缝长度范围内允许存在的缺陷显示痕迹总长≤25 mm
线形缺陷	夹渣或气孔	不允许	≤0.3δ，且≤4 mm 相邻两缺陷显示痕迹的间距应不小于其中较大缺陷显示痕迹长度的6倍	≤0.3δ，且≤10 mm 相邻两缺陷显示痕迹的间距应不小于其中较大缺陷显示痕迹长度的6倍	≤0.5δ，且≤20 mm 相邻两缺陷显示迹痕的间距应不小于其中较大缺陷显示迹痕长度的6倍
圆形缺陷	夹渣或气孔	不允许	任意 50 mm 焊缝长度范围内允许存在显示长度≤0.15δ，且≤2 mm 的缺陷显示痕迹 2 个 相邻两缺陷显示痕迹的间距应不小于其中较大缺陷显示痕迹长度的6倍	任意 50 mm 焊缝长度范围内允许存在显示长度≤0.3δ，且≤3 mm 的缺陷显示痕迹 2 个 相邻两缺陷显示痕迹的间距应不小于其中较大缺陷显示痕迹长度的6倍	任意 50 mm 焊缝长度范围内允许存在显示长度≤0.4δ，且≤4 mm 的缺陷显示痕迹 2 个 相邻两缺陷显示痕迹的间距应不小于其中较大缺陷显示痕迹长度的6倍

注：δ 为焊缝母材的厚度。当焊缝两侧的母材厚度不相等时，取其中较小那个厚度值作为 δ。

4.9　国外焊缝磁粉探伤标准

（1）欧洲 EN1290：1998 + Al：2002

该标准为焊缝磁粉探伤标准，其规定了焊缝（包括热影响区）表面缺陷的磁粉探伤工艺方法。其主要内容如下。

1）磁场方向　缺陷的可检性取决于缺陷主轴相对于磁场方向的夹角，见图 8.2-43。

2）典型磁粉探伤方法　常见焊接接头形式磁粉探伤法的应用见表 8.2-51。其他几何形状的被检焊缝也可参照使用相同的磁化条件，并应满足下式：

$$d = W_1 + W_2 + 50\ \text{mm}$$

式中，d 为磁通或通电路径，mm；W_1 为焊缝宽度，mm；W_2 为热影响区宽度，mm。

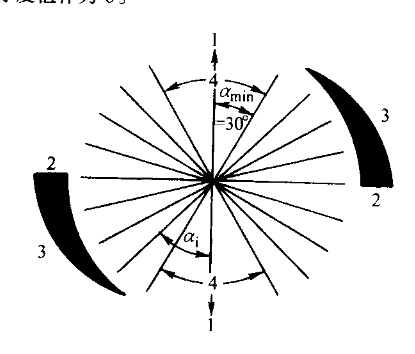


图 8.2-43　缺陷可检方向

1—磁场方向；2—最佳灵敏度；3—灵敏度降低；4—灵敏度不够；α—磁场与缺陷方向夹角；α_{min}—缺陷最小可检角；α_i—缺陷方向示例



表 8.2-51　典型磁化方法和参数　mm

磁轭典型磁化法		触头的典型磁化法 磁化电流≥5 A/mm（有效值）		绕电缆或线圈的典型磁化法	
	$d\geqslant75$ $b\leqslant d/2$ $\beta\approx90°$		$d\geqslant75$ $b\leqslant d/2$ $\beta\approx90°$	探纵向裂纹	$20\leqslant a\leqslant50$ $NI\leqslant8D$
探纵向裂纹 探横向裂纹	$d_1\geqslant75$ $d_2\geqslant75$ $b_1\leqslant d_1/2$ $b_2\leqslant d_2-50$		$d\geqslant75$ $b\leqslant d/2$	探纵向裂纹	$20\leqslant a\leqslant50$ $NI\leqslant8D$
探纵向裂纹 探横向裂纹	$d_1\geqslant75$ $d_2\geqslant75$ $b_1\leqslant d_1/2$ $b_2\leqslant d_2-50$		$d\geqslant75$ $b\leqslant d/2$	探纵向裂纹	$20\leqslant a\leqslant50$ $NI\leqslant8D$
探横向裂纹 探纵向裂纹	$d_1\geqslant75$ $d_2\geqslant75$ $b_1\leqslant d_1/2$ $b_2\leqslant d_2-50$		$d\geqslant75$ $b\leqslant d/2$	N：匝数 I：电流（有效值） a：焊缝与线圈或焊缝与电缆之间间距	

（2）欧洲 EN1291：1998 + Al：2002

标准规定了焊缝磁粉检测的验收等级。其主要内容如下。

1）定义

①线性显示　$L/W>3$ 的显示。

②非线性显示　$L/W\leqslant3$ 的显示。

式中，L 为显示的长度，mm；W 为显示的宽度，mm。

2）验收等级　检测面宽度应包括焊缝和邻近母材（两侧各 10 mm），其验收等级见表 8.2-52。

表 8.2-52　显示的验收等级　mm

显示类型	验收等级①		
	1	2	3
线性显示（l：显示长度）	$l\leqslant1.5$	$l\leqslant3$	$l\leqslant6$
非线显示（d：主轴尺寸）	$d\leqslant2$	$d\leqslant3$	$d\leqslant4$

①　验收等级 2 和 3 可规定冠以 ×，以表示所检出的各种线性显示应按 1 级评定。但小于原验收等级所示值的显示，其检出率可能较低。

4.10　磁粉探伤工艺卡

磁粉探伤工艺卡是指导磁粉探伤人员对具体产品进行磁粉探伤的工艺性文件，多以图表为主，如表 8.2-53。

4.11　磁性探伤的新技术

磁粉探伤的不足是实现自动化以及检验水下钢结构较为困难。20 世纪 80 年代初开发出的无触点交流电磁场测量技术（ACFM），可以对焊缝表面裂纹的长度与深度进行非接触式测量，其原理见图 8.2-44。采用特殊设计的短螺旋管线圈可以在工件中感应出交流电流（约 5 kHz），该电流受趋肤效应的影响均匀分布在工件表面，同时也在表面以上的空间产生均匀的交流电磁场。如果工件表面含有缺陷，则电流的均匀分布受到破坏，其空间电磁场也产生变形。利用两个互相垂直的线圈能够测量出平行于裂纹和垂直于裂纹的磁场分量 B_x 与 B_z。其中 B_z 的幅度对应于裂纹端点的位置。B_x 的幅值与裂纹深度对应，于是就可以同时测量裂纹的长度与深度。

表 8.2-53　磁粉探伤工艺卡示例

检验单位	磁　粉　探　伤　工　艺　卡		委托单位
×××			×××
工件名称	氧气罐	容器类别	Ⅱ类
材　质	16MnR	表面状况	露出金属光泽
工件规格	ϕ2 000 mm×4 000 mm×6 mm	施加磁悬液	喷洒
探伤部位	A、B、D 焊缝及热影响区	工序安排	焊完 24 h 后
检验比例	100%	试　片	15/50 或 30/100 的 A 型试片
检验方法	湿连续法	磁粉、磁悬液	黑磁粉、水磁悬液
磁化方法	旋转磁场多向磁化法，磁轭法	磁化设备	CYE3 CDX-1
磁化规范	>9 kg 提升力，磁轭法>44 N	退磁要求	<0.2 mT
探伤方法标准	JB 4730—94	质量验收标准	JB 4730—94/Ⅱ级
操作程度	预处理	磁头移动速度	试验值确定
	磁　化	试件表面照度	不小于 500 lx
	施加磁悬液		
	检　验		
	退　磁		
	后处理		
编制	审核	批准	日期
×××	×××	×××	×××

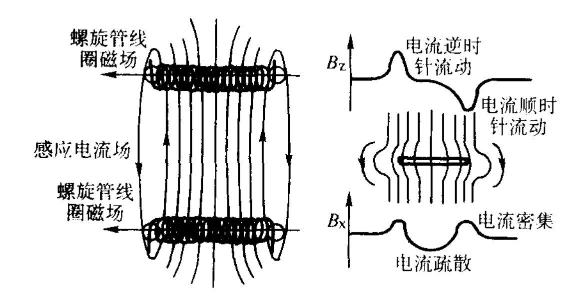


图 8.2-44　交流电磁场测量裂纹原理

由于交流电磁场测量技术的基础是利用线圈感应原理在工件表面产生均匀分布的电流与空间电磁场，因此不需要与工件接触。探头与工件表面的距离可达 5～10 mm，从而减轻了表面清理作业。对探头与工件间的间隙不十分敏感，同时测量前也不需要采用试块进行校准。由于这些优点，目前该方法在自动检验海上钢结构焊缝方面已部分地代替了磁粉探伤。

ACFM 技术不但可以应用在水下平台节点焊缝的检查上，也可用在水面以上钢结构的检查中，特别是含有防护涂层与高温（居理点以下）构件的检验上更加有效。

5　焊缝的渗透探伤

渗透探伤适用于除多孔性材料以外的各种金属和非金属材料的表面开口缺陷的无损检测方法。

5.1　渗透探伤的原理与分类

当含有颜料或荧光粉剂的渗透液喷洒或涂敷在被检焊缝的表面上时，利用液体的毛细作用，使其渗入表面开口的缺陷中。然后清洗去除表面上多余的渗透液、干燥后施加显像剂，将缺陷中的渗透液吸附到焊缝表面上来，从而能观察到缺陷的显示痕迹，进而评定焊缝的质量，其基本步骤见图 8.2-45。

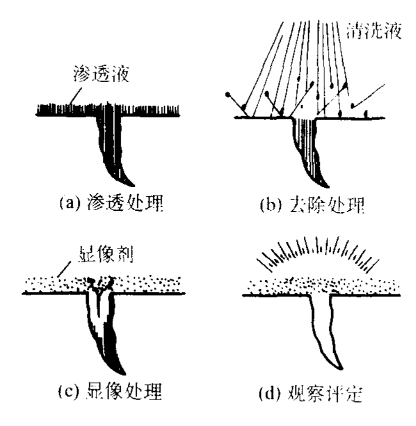


图 8.2-45　渗透探伤的基本步骤

一般可以按照渗透剂和清洗过程的不同，把渗透探伤划分为如表 8.2-54 所示类别。同样还可以按照不同的显像过



程把渗透探伤划分为采用干式显像剂、湿式显像剂（包括快干显像剂）和不用显像剂的显像方法。

表 8.2-54　探伤方法、渗透剂类别与适用范围

方法名称	渗透剂种类	特点与应用范围
荧光渗透探伤	水洗型荧光渗透剂	零件表面上多余的荧光渗透液可直接用水清洗掉。在紫外线灯下，缺陷有明显的荧光痕迹，易于水洗，检查速度快，适于中小件的批量检查
	后乳化型荧光渗透剂	零件表面上多余的荧光渗透液要用乳化剂乳化处理后方能水洗清除。有极明亮的荧光痕迹，灵敏度很高，适于高质量检查的要求
	溶剂去除型荧光渗透剂	零件表面上多余的荧光渗透液要用溶剂去除。检验成本高，一般不用
着色渗透探伤	水洗型着色渗透剂	与水洗型荧光渗透剂相似，不需要紫外线光源
	后乳化型着色渗透剂	与水洗后乳化型荧光渗透剂相似，不需要紫外线光源
	溶剂去除型着色渗透剂	一般装在喷罐中，便于携带，广泛用于无水区高空、野外结构的焊缝检验

5.2　渗透探伤剂与灵敏度试块

（1）渗透探伤剂

渗透探伤剂包括渗透剂、去除剂和显像剂，其组成和性能要求见表 8.2-55。

（2）灵敏度试块

常用的渗透探伤灵敏度试块见表 8.2-56 和图 8.2-46。根据试块的材料和制造工艺的不同，划分为 A、B 和 C 三种类型，其主要参数和用途如表 8.2-56 所示。

表 8.2-55　渗透探伤剂的组成和性能要求

渗透探伤剂	组　成　特　点	性　能　要　求
渗透剂	一般由颜料、溶剂、乳化剂和多种改善渗透性能的附加成分组成	渗透力强，鲜艳的颜色或鲜明的荧光，清洗性能好并易于从缺陷中吸出
去除剂	1）水洗型去除剂主要是水 2）后乳化型主要为乳化剂和水，乳化剂以表面活性剂为主并附加有调整黏度等的溶剂 3）溶剂去除型主要是有机溶剂	乳化剂应易于去除渗透液，黏度适中，良好洗涤作用，外观易于与渗透剂区分，性能稳定，无腐蚀，闪点高，无毒，对渗透液溶解度大，有一定的挥发性和表面湿润性，不干扰渗透剂功能
显像剂	1）干式显像剂为粒状白色无机粉末，如氧化镁、氧化钛粉等 2）湿式显像剂为显像粉末溶解水中的悬浮液，附加润湿剂、分散剂及防腐剂等 3）快干式显像剂是将显像粉末加在挥发性有机溶剂中，加有限制剂和稀释剂等	各种显像剂都要满足： 1）显像粉末呈微粒状，易形成均匀薄层 2）与渗透剂有高的衬度对比 3）吸湿能力强，吸湿速度快 4）性能稳定，无腐蚀，对人体无害

注：1. 检验镍合金探伤剂的含硫量（质量分数）均不应超过残留物质量的 1%。
2. 检验奥氏体不锈钢或钛合金焊缝时，各探伤液的氯和氟含量（质量分数）之和应不超过残留物质量的 1%。

表 8.2-56　常用的渗透探伤灵敏度试块主要参数与用途

试块名称	型　号	试块材料	试块尺寸/mm	缺陷形式	主要用途
铝合金淬火试块	A	铝合金	50×75 厚度 8~10	淬火裂纹	灵敏度对比，综合性能比较
不锈钢镀铬辐射状裂纹试块	B	1Cr18Ni9Ti 单面镀铬	130×25×4 镀层厚度 0.025	压制裂纹	校正操作方法和工艺系统灵敏度
黄铜板镀铬裂纹试块	C	黄铜镀铬	100×70×4 镀层厚度 0.02~0.05	弯曲裂纹	鉴别渗透剂性能和确定灵敏度等级

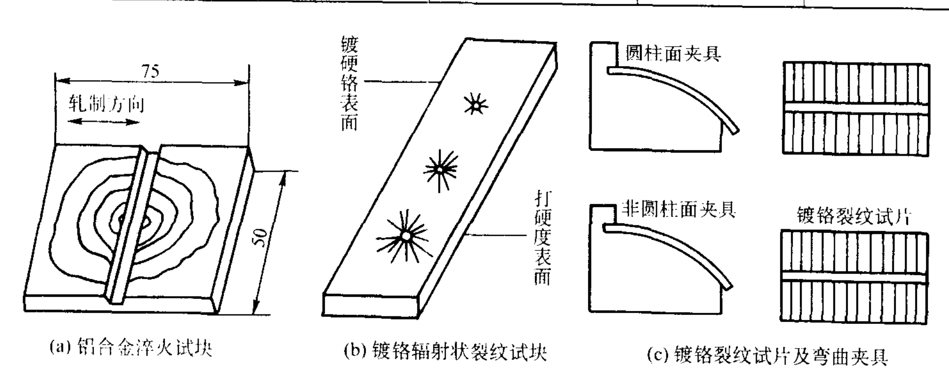


图 8.2-46　常用渗透探伤试块



5.3 渗透探伤的一般操作程序

几种常用的渗透探伤方法的操作程序见图8.2-47，渗透探伤的各项操作要点见表8.2-57。

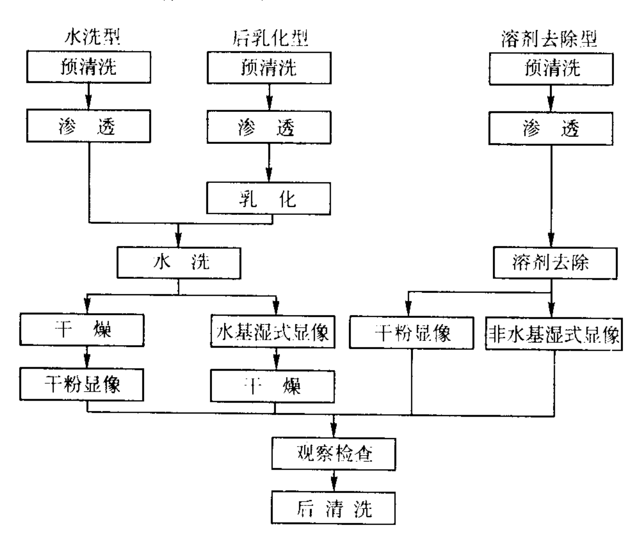


图8.2-47　渗透探伤的操作程序

注：干粉显像即干式显像，水基湿式显像，非水基湿式显像即快干式显像

5.4 痕迹的解释与缺陷评定

对显示痕迹的解释是正确判定缺陷的基础，痕迹可能是真实缺陷引起的，也可能是由于结构形状或表面多余渗透液未清洗干净所致。

痕迹长轴和短轴之比小于3 mm的为圆形，大于等于3 mm的为线形。各种常见焊接缺陷痕迹的特征见表8.2-58。焊缝痕迹可按JB/T 6062—1992《焊缝渗透检验方法和缺陷痕迹的分级》标准的规定进行评级，其内容与JB/T 6061—1992标准相同，见表8.2-50，或参考其他各专业标准的规定。对发现并可判定的表面与近表面裂纹和其他超标缺陷应打磨消失，打磨过深应补焊到与表面相同。

5.5 国外渗透探伤标准

(1) 欧洲EN 571－1：1997

该标准规定了渗透探伤的一般性原则，其主要内容如下。

1) 渗透探伤方法分类　根据渗透剂和显像剂种类的不同，渗透探伤方法按表8.2-59分类。

2) 渗透探伤工艺摘要　工作温度要求在10～50℃，特殊情况最低不能低于5℃；渗透时间要求在5～60 min；中间清洗时，应防止清洗过度，荧光检测可在紫外线灯照射下处理，其工件表面辐照度不得低于300 μW/cm²；显像时间要求在10～30 min；观察条件要求荧光检测时，白光应不大于20 lx，且观察人员应先在暗处停留5 min，以便让眼睛适应环境，着色检测时白光照度应不小于500 lx，荧光检测工件辐照度大低于1 000 μm/cm²。

表8.2-57　渗透探伤的一般工艺摘要

探伤步骤	操作内容
预处理	焊缝表面及两侧至少25 mm区域，采用砂轮打磨等方法清除焊渣、飞溅、氧化皮，不允许用喷砂、喷丸等清理方法
预清洗	用清洗液洗净焊缝检验区表面的油污并经强热风吹干或自然蒸发，使其充分干燥
渗透处理	采用浸、刷、喷等方法涂敷渗透液，温度为10～15℃，时间不得小于5 min
乳化处理	采用喷、浇、浸等方法，合适的乳化时间必须通过试验确定
去除处理	1）水洗型或后乳化型经乳化处理后用喷水方法清洗，水压不超过0.345 MPa，水温不超过40℃ 2）溶剂去除型可用布或纸沿一个方向擦拭，禁用冲洗方式
干燥处理	可用干净材料吸干、热风吹干或自然挥发干燥，表面温度不应超过50℃
显　像	可采用喷、浸、刷等方法，在10～50℃范围内显像时间一般为7 min
观　察	在显像的同时即应观察，其条件为，着色法要求白光照度大于500 lx，荧光法应在白光小于20 lx的暗环境，黑光强度应不小于1 000 μW/cm²
后处理	可用布、纸擦除，也可用水冲洗或喷气清除

表8.2-58　各种焊接缺陷痕迹的特征

缺陷种类		显示痕迹的特征
焊接气孔		显示呈圆形、椭圆形或长圆形，显示比较均匀，边缘减淡
焊缝与热影响区裂纹	热裂纹	一般显示出带曲折的波浪状或锯齿状的细条纹
	冷裂纹	一般显示出较直的细条纹
	火口裂纹	显示出星状或锯齿状条纹
	应力腐蚀裂纹	一般在热影响区或横贯焊缝部位显示出直而长的较粗条纹
未焊透		呈一条连续或断续直线条纹
未熔合		呈直线状或椭圆形条纹
夹　渣		缺陷显示不规则，形状多样且深浅不一



表 8.2-59　渗透探伤方法分类

渗透剂		清洗剂		显像剂	
类　型	名　称	方　法	名　称	种　类	名　称
Ⅰ	荧光	A	水	a	干式显像
		B	亲油性乳化剂		
			1）油基乳化剂	b	水基湿式，可水洗
Ⅱ	着色		2）可用流水冲洗		
		C	溶剂（流动相）	c	水悬浮型湿式
		D	亲水性乳化剂		
Ⅲ	着色和荧光		1）选择性预清洗（用水）	d	溶剂型
			2）用水稀释的乳化剂		
			3）用水洗	e	湿式水或溶剂基用在特殊应用领域（如可揭式显像剂）
		E	水和溶剂		

注：对检测试剂腐蚀性有特殊要求时，对硫含量、卤素含量、钠含量及其他污染物含量的要求见 EN571－2。

（2）欧洲 EN1289：1998＋Al：2002

标准规定了焊缝渗透检测的验收等级。其主要内容如下。

1）定义

① 线性显示　长宽比大于 3 的显示。

② 非线性显示　长宽比小于等于 3 的显示。

2）验收等级　检测面宽度应包括焊缝和邻近母材（两侧各 10 mm），其验收等级见表 8.2-60。

表 8.2-60　显示的验收等级　　mm

显示类型	验收等级①		
	1	2	3
线性显示（l：显示长度）	$l\leqslant2$	$l\leqslant4$	$l\leqslant8$
非线显示（d：主轴尺寸）	$d\leqslant4$	$d\leqslant6$	$d\leqslant8$

① 验收等级 2 和 3 可规定冠以 ×，以表示所检出的各种线性显示应按 1 级评定。但小于原验收等级所示值的显示，其检出率可能较低。

5.6　渗透探伤工艺卡

渗透探伤工艺卡是指导渗透探伤人员对具体产品进行渗透探伤的工艺性文件，多以图表为主，如表 8.2-61。

5.7　渗透探伤的新技术

近年来随着科技的发展，渗透探伤技术也有了很大发展，出现了反应型渗透剂、高温型渗透剂、不燃型渗透剂等许多特种渗透剂，这些特种渗透剂克服了传统渗透剂的某些不足，从而拓宽渗透探伤的使用范围，提高了检测灵敏度。

1）反应型渗透剂　是一种无色或颜色极浅的透明液体，其与显像剂发生化学反应会显出红色，其中有些成分在荧光灯下会发出金黄色的荧光。它的特点是缺陷显示清晰，不会污染工件或操作者的衣服和皮肤，缺陷衬度高，有利于提高缺陷分辨率等优点。

2）高温型渗剂　可在高温环境下使用，工作温度可达 5～180℃，适用于高温在役设备和管线的运行检测，以及焊接过程中检测，具有性能稳定、不挥发、抗氧化、灵敏度高的特点。

表 8.2-61　渗透探伤工艺卡示例

容器名称	×××	容器类别	Ⅱ	容器规格	ϕ800 mm×1 000 mm
主体材质	奥氏体不锈钢	公称壁厚	6 mm	表面状况	3.2
探伤方法	VC－S	探伤部位	环缝、纵缝	探伤比例	100%
环境温度	15～50℃	对比试块	B 型试块	观察方式	目　视
渗透剂	QA－RS	去除剂	QA－BX	显像剂	QA－EV
探伤方法标准	JB 4730—1994/12		质量验收标准	JB 4730—1994/Ⅱ	
操作程序	预处理	探伤部位示意：纵缝　环缝			
	渗　透				
	去除多余渗透剂				
	干　燥				
	显　像				
	检验和评定				
	后处理				

续表 8.2-61

序　号	技术参数说明		备　注	
1	渗透温度15～50℃，渗透时间>10 min			
2	显像时间>7 min			
3	渗透探伤剂应控制硫、氮、氟含量，均不得大于1%			
单　位	编　制	审　核	批　准	日　期
×××	×××	×××	×××	×××

3）不燃型渗透剂　克服了传统渗透剂易燃的弱点，解决了渗透剂的安全问题，其闪点高，可耐高温达230℃，因此可在高温和明火下工作。

6　焊缝的涡流探伤

涡流探伤只适用于探测导电材料的表面或近表面缺陷。目前，焊缝探伤主要采用多频涡流或脉冲涡流。

6.1　涡流探伤的原理

涡流探伤是以电磁感应原理为基础，当焊接钢管经过通以高频电流的电磁线圈时，因交变磁场的作用，会在焊管中产生涡流，其中如有缺陷，就会引起涡流的变化，涡流所产生的感应磁场和激励磁场所组成的合成磁场也要变化，就可以将缺陷检测出来，见图8.2-48。

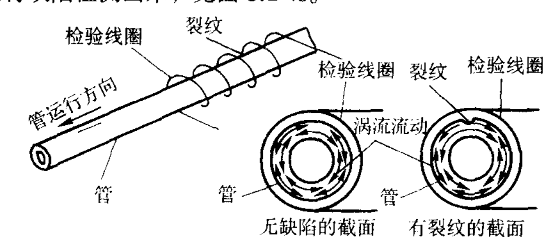


图8.2-48　涡流探伤示意

6.2　涡流探伤系统和探头

涡流探伤系统一般由振荡器、线圈、放大器等组成，见图8.2-49。涡流探头分类方法很多，根据检测线圈和工件的相对位置可以分为穿过式、探头式、插入式三种，如图8.2-50。根据线图的使用方式，只用一个线圈工作的方式称为绝对式，使用两个线圈进行反接的方式为差动式，两种线圈的比较见表8.2-62。

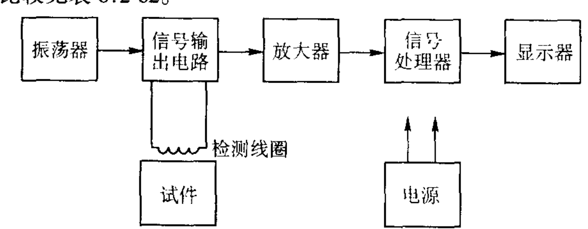


图8.2-49　涡流探伤系统原理图

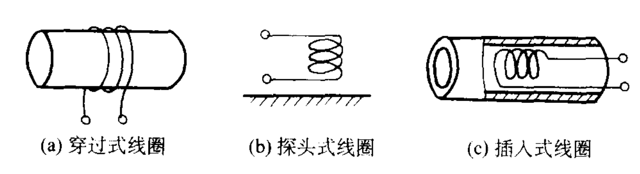


图8.2-50　探测线圈分类

表8.2-62　绝对式探头和差动式探头的比较

分类	优　点	缺　点
绝对式探头	1）对材料性能或形状的突变或缓慢变化均能作出反应 2）混合信号较易区分出来 3）只能显示缺陷的整个长度	1）温度不稳定时易发生漂移 2）对探头的颤动比差动式敏感
差动式探头	1）不会因温度不稳定而引起漂移 2）对探头颤动的敏感度比绝对式低	1）对平缓变化不敏感，即长而平缓的缺陷可能漏检 2）只能探出长缺陷的终点和始点 3）可能产生难以解释的信号

6.3　涡流探伤技术和过程

焊接钢管焊缝的探伤检查，一般可采用扇形线圈式探伤技术，如图8.2-51所示。检查线圈应与焊缝保持在一条直线上，其目的是使整个焊缝都能被扫描到。

涡流探伤频率通常在1～25 kHz范围内，能检出焊管中裂纹、缩孔、夹渣等缺陷；可检测$\phi 3$～400 mm的各种金属管的高频焊焊缝，检测速度能与焊管焊速相匹配时，可进行生产线的在线探伤，见图8.2-52。

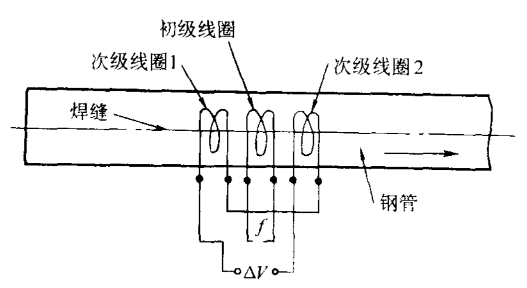


图8.2-51　扇形线圈焊缝涡流探伤方法简图

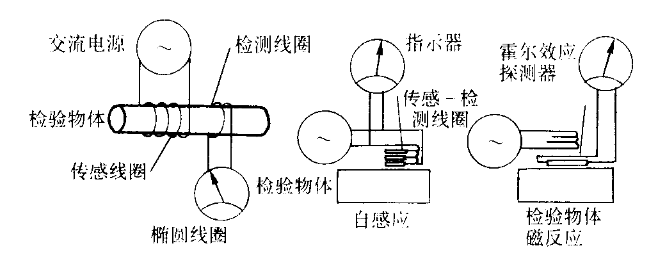


图 8.2-52　涡流检测过程

表 8.2-63　验收等级 A 和验收等级 B 的钻孔直径

（摘自 GB/T 7735—1995）　mm

验收等级 A		验收等级 B	
钢管外径	钻孔直径	钢管外径	钻孔直径
$D \leqslant 27$	1.20	$D \leqslant 6$	0.50
$27 < D \leqslant 48$	1.70	$6 < D \leqslant 19$	0.65
$48 < D \leqslant 64$	2.20	$19 < D \leqslant 25$	0.80
$64 < D \leqslant 114$	2.70	$25 < D \leqslant 32$	0.90
$114 < D \leqslant 140$	3.20	$32 < D \leqslant 42$	1.10
$140 < D \leqslant 180$	3.70	$42 < D \leqslant 60$	1.40
$D > 180$	双方协议	$60 < D \leqslant 76$	1.80
		$76 < D \leqslant 114$	2.20
		$114 < D \leqslant 152$	2.70
		$152 < D \leqslant 180$	3.20
		$D > 180$	双方协议

6.4　对比试样

为确保检测结果的可靠性，一般采用与被检工件同材质和状态的材料，按标准要求加工出一定规格的人工缺陷作为调整仪器灵敏度的对比试样，对比试样上的人工缺陷可开槽或钻孔，种类和形状见图 8.2-53。钻孔型对比试样应保证有一个孔是在焊缝上，通过由此所得到的信号来设定检测设备的触发－报警电平，以此来确保检测灵敏度，其钻孔直径见表 8.2-63。

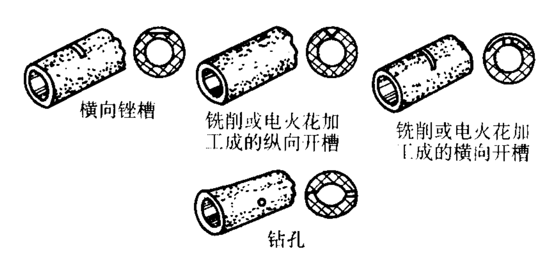


图 8.2-53　对比试样上人工缺陷的种类和形状

6.5　涡流探伤的一般操作程序

涡流探伤方法的一般操作程序见图 8.2-54。

6.6　探伤结果的评定

当焊管通过涡流探伤设备时，其产生的信号低于触发－报警电平，则应判定引管合格，反之，应认定为可疑管且重新检验并采取措施进行处置。

6.7　涡流探伤技术的新发展[15]

近年来涡流探伤技术在管道、核容器、化工容器方面得到了很快的发展和应用，由于核容器和石油加氢裂化容器的不锈钢堆焊层的组织粗大，采用超声波探伤时衰减和干扰较大，而采用涡流探伤就比较成功，特别是 8 mm 堆焊层的检测。

在探伤过程中，采用调幅方式的多频涡流是基于低频成分能渗透较大深度的原理。实验表明，采用频率 500 Hz、2 800 Hz 和 5 000 Hz 的低频绝对发射－差动接收双线圈探头进行检测，可检出堆焊层内缺陷、堆焊层与母材分离及层下裂纹。典型的多频涡流探伤系统方框图见图 8.2-55。

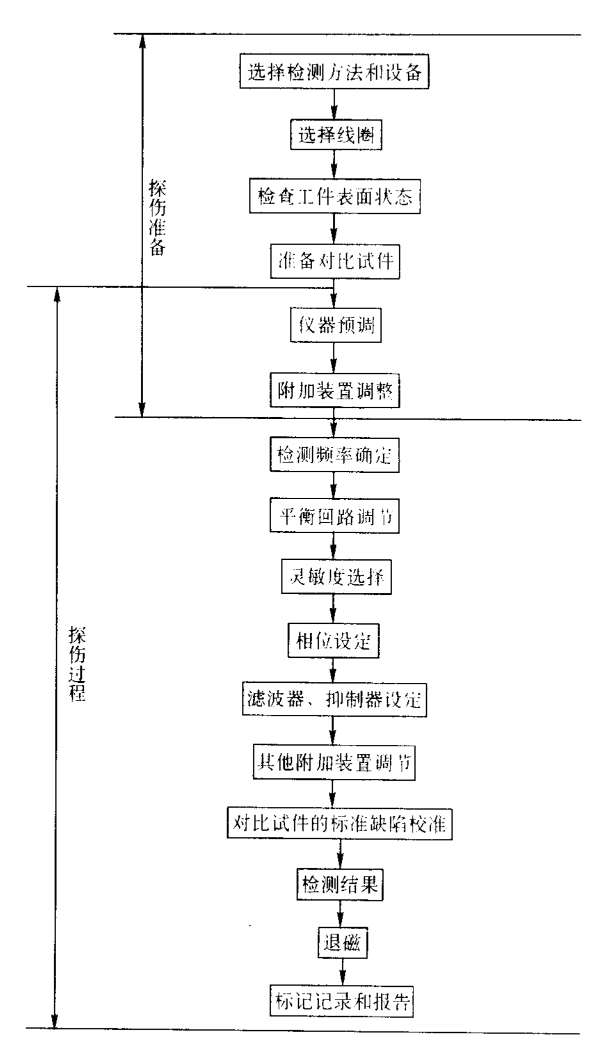


图 8.2-54　涡流探伤一般操作程序

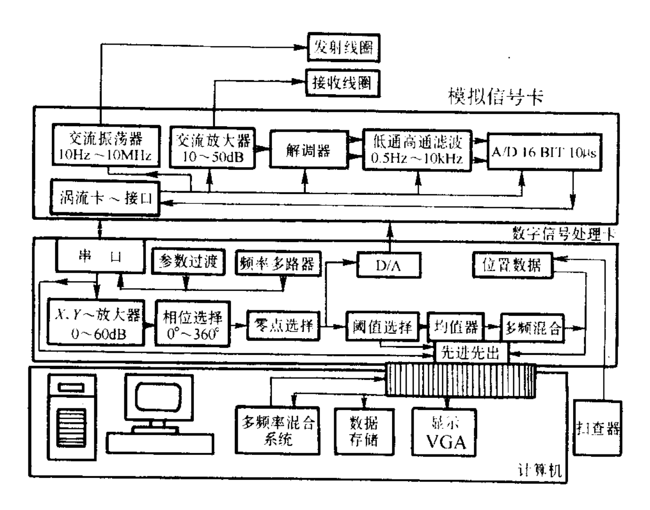


图 8.2-55　核容器不锈钢堆焊层多频涡流探伤系统方框图



7 焊缝无损检验的新方法

7.1 声发射

近年来，声发射用于焊接结构的无损检测，特别是在石油化工企业压力容器的检测上获得了很大的成功，并且逐步地发展成为评定容器缺陷是否处于活动性或扩展性状态的方法。

1）声发射检测原理　当焊接容器承受载荷时，如果焊缝内某点产生塑性变形就会伴随有弹性能量的释放，因而激发起弹性波的传播，呈现为有源声发射。例如，此现象可发生在裂纹扩展过程、受压容器与管道的蠕变、氢脆、热冲击及应力断裂过程，同样也发生在不锈钢堆焊层的剥离过程中。这种弹性声波可由压电换能器转换为电信号，从而能测量出声发射源的位置和强烈程度。声发射信号的典型波型见图8.2-56。

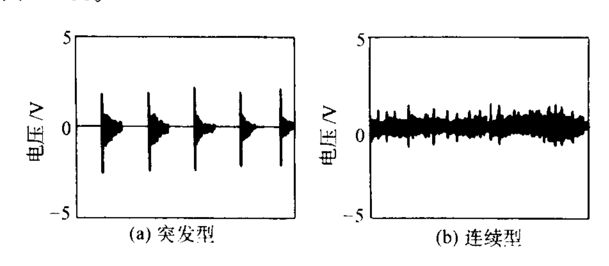


图8.2-56　声发射信号的典型波形

2）声发射信号的测量参数　与其他无损检测技术不同，采用声发射测量法评定缺陷活动区的严重程度需要测量的参数较多。例如，声发射的频次，每次发射信号的幅度、升起时间、下降时间、持续时间和能量（即整流信号的包络面积，MARSE）等，见图8.2-57。

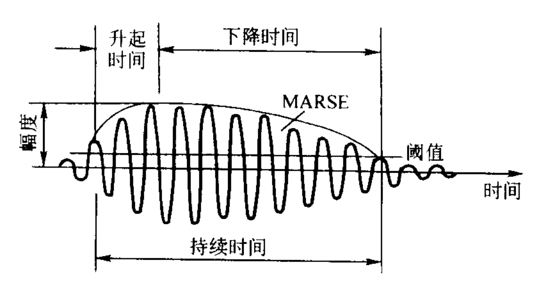


图8.2-57　声发射信号的测量参数

3）声发射检测仪器　声发射仪器大体可分为两种基本类型，即单通道声发射仪和多通道声发射源定位和分析系统。单通道声发射检测仪一般由换能器（传感器）、前置放大器、衰减器、主放大器门槛电路、声发射率计数器及数模转换器等组成；多通道系统则在通道的基础上增加了数字测定系统及计算机数据处理和外围显示系统。

一般情况下，声发射源的位置是未知的，因此采用很多传感器布置在容器表面上，由测量信号时间差的办法确定声源位置。压力容器声发射检测见图8.2-58。

4）声发射信号与压力的关系　除了声发射信号本身强度和频次外，它还与容器试验压力有很大的关系，所以要测量不同压力下和最大压力时的信号特征。

由于测量过程多半是在水压状态下的容器表面上进行的，一般试验压力达90%～110%操作压力，有的情况下甚至高达110%～135%的设计压力，见图8.2-59。因此，为了防止在试验过程中容器发生低温脆性破裂，可采用蒸汽加热方式把水温升高到29～30℃。随着压力的升高，声发射活动区增多，强度加大。

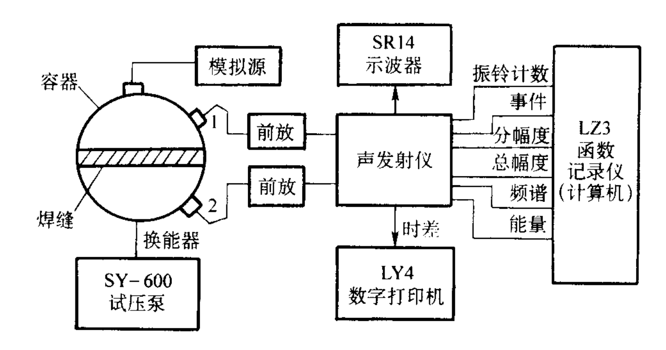


图8.2-58　不锈钢压力容器声发射检测装置方框图

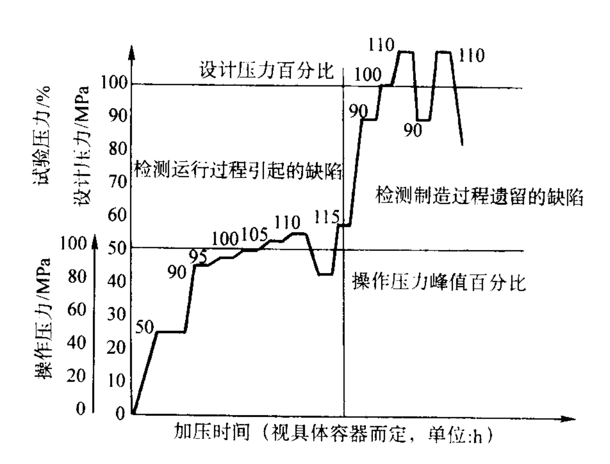


图8.2-59　容器声发射测量的压力增加阶梯曲线原理图

表8.2-64　声发射活动规律的试验结果

声发射活动增加	声发射活动减少
高强度材料	低强度材料
低　温	高　温
高变形率	低变形率
厚大截面	薄　板
脆性破裂	塑性破裂
裂纹尖端扩展	塑性变形

目前，声发射现象与结构状态和类型间的关系还没有统一的理论解释，通过试验得出的定性规律见表8.2-64。

5）检验结果的评定　声发射结果的评定方法分声发射频率、声发射源的活动和强度、声发射特性三种，但由于这些方法都不够精确，因此，近年来又提出了综合评价方法，见图8.2-60和表8.2-65。

7.2 金属磁记忆检测

金属磁记忆检测是一种全新的铁磁性金属材料检测技术，它具有设备轻便、操作简单、原理可靠、灵敏度高、重复性与可靠性好的特点。对于石油、化工、电力等领域有着广阔应用前景。

1）金属磁记忆检测原理　由于焊接缺陷会产生异常的磁畴结构，并以漏磁场的形式外延至焊缝表面，所以通过分析焊缝的磁场强度分量 H_p，就可确定焊缝中是否存在缺陷

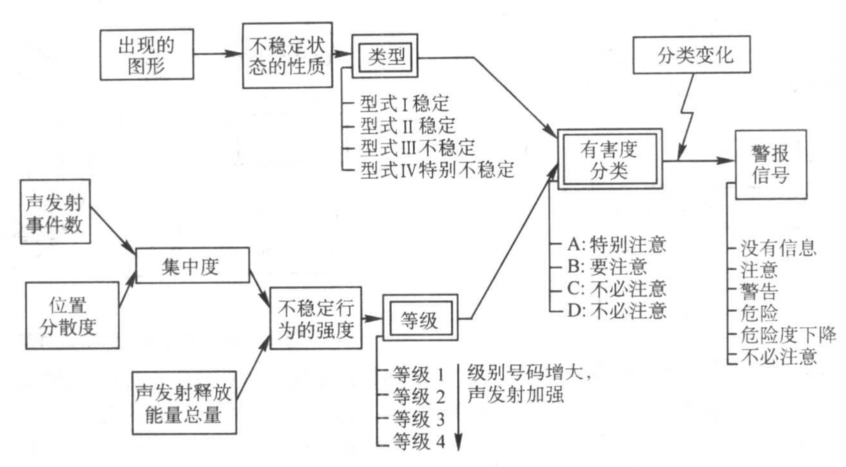


图 8.2-60　缺陷有害度综合评价原理图

表 8.2-65　压力容器缺陷有害度评价

随压力变化的声发射发生类型	声发射标定位置集中程度		
	大	中	小
1）全过程频发型	a	a	b
2）高压下急增型	a	b	b
3）高中压频发、高压减少型	b	c	d
4）低中压频发、高压停止	c	d	e
5）全过程散发型	c	c	e
6）部分散发型	c	e	e

缺陷分类	安全性	缺陷严重程度
a	极不安全	重大缺陷（需特别注意）
b	不安全	大缺陷（应加以注意）
c	稍不安全	中等缺陷（注意）
d	安全	小缺陷（稍加注意）
e	非常安全	无害缺陷（无需注意）

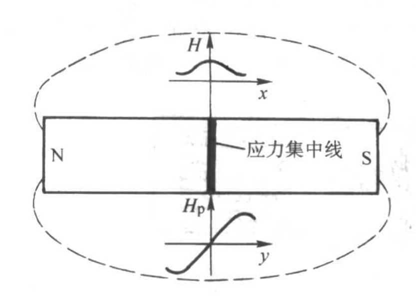


图 8.2-61　磁记忆检测的原理

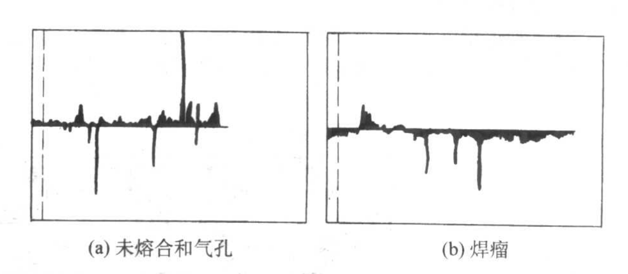
和应力集中区域。磁记忆检测就是利用这一原理来进行焊缝检测和早期诊断的，见图 8.2-61。其检测时无需对工件表面进行清理，且能实现快速自动检测，检测速度可达 100 m/h。

2）金属磁记忆检测设备　EMS－2000 智能化磁记忆金属诊断仪是基于铁磁金属磁记忆原理，采用先进的微电子技术、计算机技术和磁记忆检测技术研制而成的新一代无损检测仪器。它具有多通道，不需对被检测对象专门充磁，无需进行表面预处理，检测速度快，对有表面保护层的部件允许提离至 150 mm 进行检测，见图 8.2-62。其主要技术指标为：测量通道 4 个；最小步距 1 mm；最大测距 150 mm；最小测距 1 mm；最大扫描速度 0.5 m/s；微处理器 16 位；存储器 2 M；内存容量 4 M（可扩展至 2 G）；高亮度场致发光屏 EL256×320；工作温度范围 －25～60℃；机内电源 12 V 5AH（可充电镍镉电池）；外接电源 AC220V 或 DC27V。



图 8.2-62　EMS－2000 型金属磁记忆探伤仪

3）金属磁记忆检测应用　在实际应用过程中，磁记忆检测对焊缝中的裂纹、未熔合、气孔等焊接缺陷的检测灵敏度已能满足检验要求，其检出的焊接缺陷磁场强度分布见图 8.2-63。



(a) 未熔合和气孔　　(b) 焊瘤

图 8.2-63　水冷壁管磁记忆检测散射磁场强度 H_p 分布图

7.3　红外热成像检测

近年来红外热成像检测技术已在石油、化工、电力等领域广泛的应用，它具有非接触、远距离、大范围、精度高、动态响应快、图像直观等特点。

1）红外热成像检测原理　它是将被检工件产生的不可见红外辐射转换成可见光图像进行显示的检测方法。由于焊缝中有缺陷和无缺陷部位所对应的表面温度不同，其产生的红外辐射也不同，因此可通过焊缝表面温度的分布状态来确定缺陷部位。

2）红外成像检测系统　其一般由热源、红外探测器、红外热像仪、图像采集处理系统、显示和记录系统等组成，见图 8.2-64。它通过热源产生均恒热流，由红外探测器测得



被检焊缝的红外辐射能，再由图像采集处理系统采集热像仪的信号，将焊缝表面温度分布状态显示在监视器上，经过图像处理就可观察到焊缝中缺陷的大小、形状和所处部位。

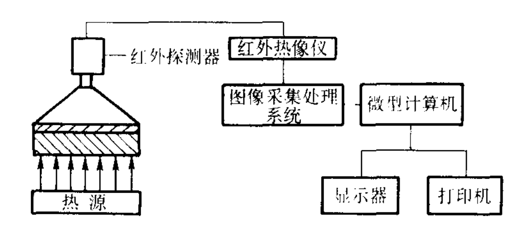


图 8.2-64　红外热成像检测系统框图

3）红外热成像检测方法　按检测方法可分为主动式和被动式两类。按被检工件加热状态可分为稳态和非稳态。按工件表面温度可分为热图法、温度分布曲线法和逐点测温法三类。

7.4　长途输送管道的检测设备

由于长途输送管道一般都是在地下或穿越海底，其检验过程还不能妨碍管内油气的输送，对于检验来说难度很大。因此，要求其检验设备除具有检测功能外，还应具备长途行走、爬坡与拐弯、可记录自身周向与轴向坐标、能越过局部凸起的障碍以及无明火操作等特殊功能。经过多年的开发，目前输送管道的检验技术与设备已达到能够进行工程应用的阶段，例如利用分布式超声波或磁性传感器可检查长途输送管道的腐蚀和裂纹。

典型超声检测设备的原理见图 8.2-65，它适合于不同直径管道裂纹的探测。其传感器系统由几百到近千个直径为 15 mm 的探头组成，沿周向分布可覆盖整个管壁圆周。利用 45°横波对界面端角产生高灵敏度反射的特点，由直射与反射波分别地探测外表面与内表面裂纹，为了从两侧探测到裂纹，把探头分成两组，一组按顺时针方向，另一组按逆时针方向相对于管壁表面法线倾斜 18.9°，使两侧的横波折射角为 45°。沿管壁采用若干个直探头进行耦合层监测与管壁厚度的测量，以标出环缝位置。从而达到根据环缝坐标计算缺陷相对位置的目的。

输送管道检测设备（通称智能管道猪）的一般结构如图 8.2-66 所示。它由 4 节厢体组成，每节中采用多个直径稍大些

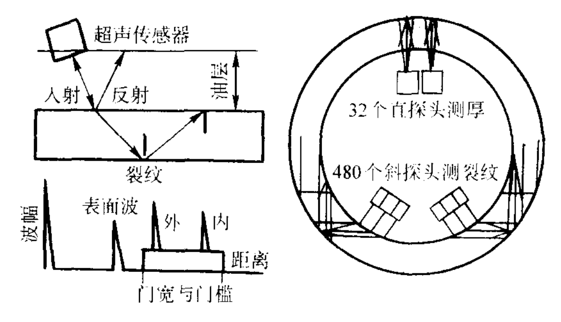


图 8.2-65　管道裂纹探测猪的探头布置示意图

的柔性聚氨酯环来保持本节与管道同心，又可以越过局部障碍。其中第一节中呈杯状的第一环为驱动环，它借助于管内流动油气的压差为全系统提供推进力，使车身向前行走，速度可达 0.3 ~ 2 m/s 之间，且不妨碍管道的输送功能。其他环均有开孔只起支撑作用。在其顶端装有高灵敏度的接收机，接收地面发射点转发的卫星定位信号，可精确地标定出车身的区段位置。第一节内还装有电子摆，能连续地测出车身是否有周向转动的极坐标信号，以确定车身的周向方位。其中还装有可充电的锂电池堆，提供整机电源，可供行走与检测 1×10^5 m 以上管道的能耗。

第二节为并行计算机数据处理系统，完成实时数据压缩与存储操作。由于检测距离长、数据量大，通常采用数据压缩技术来解决大量数据的存储问题。本节外部装有三个轮式里程计，可在管道内部测量车身的行走距离。目前，缺陷位置的测量误差可控制在 ±（0.1 ~ 0.2）m 之间。

第三节装有多组多通道传感器的电子线路板（如超声波发射、接收与模数转换等）。

最后一节是传感器保持架，根据管径要求可装数量也越大。

有几百到近千个探头。探头传感器的尺寸越小，分布越密，缺陷分辨率越高，但与其对应的信号数据各节间由活动铰链连接，能顺利地通过 1.5 ~ 3.0 倍管径的管道弯曲段。节间全密封电缆与厢体接头可保证温度在 100℃以下、压力在 10 ~ 20 MPa 之间的密封与无火花外泄。

已开发出的超声、磁性与涡流管道检测设备可适合于直径范围 150 ~ 1 420 mm 原油与天然气等管道的检验，一次检测距离可在 1×10^5 ~ 2×10^5 m 之间，最大检测管壁厚度接近 40 mm。缺陷尺寸测量误差接近于地面工件的测量结果。

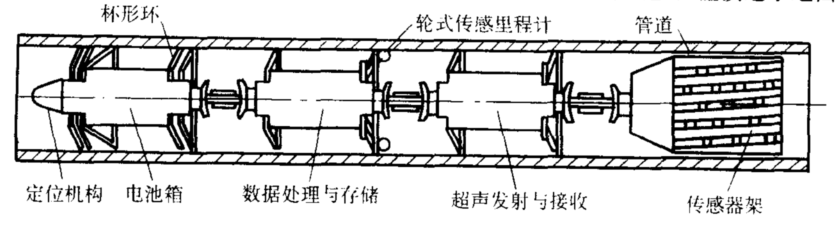


图 8.2-66　智能超声检测管道猪的宏观结构

编写：邓义刚（机械工业哈尔滨焊接技术培训中心）
解应龙（机械工业哈尔滨焊接技术培训中心）

第3章　焊接资质人员培训与资格认证

1　概述

我国的焊接培训与资格认证工作，在2000年以前，即我国获得国际授权开展国际资质焊接培训与资格认证以前，对于焊接技术人员（即工程师、技术员、质检师）尚未有相关的标准及规程，更谈不上相关的培训及资格认证。焊接技师直到1995年，国家劳动部发布了“技师”和“高级技师”职业技能鉴定的规定；但尚未与国际上的通行作法相对应和接轨。而焊工培训一直是由国家各部委及行业按照各自的规程和考试标准进行焊工的培训和资格认证工作，比如，由原劳动部制订的锅炉及压力容器焊工考试规则（后由国家质量监督检验检疫总局制订的锅炉压力容器压力管道焊工考试与管理规则）等，但未形成一个统一的与国际接轨的规程和标准，各自所培养及认证的焊工资质也无法与国际上互认。

在1984年，由中德两国政府共同合作，旨在引入国际上先进的焊接培训与资格认证体系的项目开始实施，并为此共同建立了哈尔滨焊接技术培训中心，在中德合作期间（1984~1988年），一方面在中国成功地举办了欧洲/德国焊接工程师、技师、质检师、焊工教师、焊工等各类焊接人员培训班，同时更为重要的是引入了欧洲/德国先进的培训与资格认证体系，为2000年中国获得国际授权开展世界统一的焊接培训及资格认证工作奠定了坚实的基础。

2000年中国获得国际授权后，在全国范围内积极开展了包括国际焊接工程师、技师等在内的各类国际焊接人员的培训。与此同时，中国国家标准GB/T 12467—1998“钢熔化焊焊工考试标准”也等效采用了国际标准ISO 9606-1。由于全世界对各类焊接人员采用统一的培训规程和大纲，按统一的考试标准考试，统一的资格证书在各国互认，这样，通过国际焊接培训与资格认证，一方面可以提高我国焊接界从业人员的整体水平，特别是可以培养一批了解和熟悉并掌握国际焊接相关标准的技术人才；另一方面也为推进我国的焊接企业进行国际认证提供了人员资质方面的保证。

2　国际焊接培训体系简介

建立世界范围内国际统一的焊接人员培训与资格认证体系想法的提出是在1992年的IIW（国际焊接学会）会议上，并在1993年的IIW年会上，决定在欧洲焊接人员培训体系的基础上建立国际统一的焊接人员培训体系。在1994年的IIW年会上，IIW和EWF（欧洲焊接联合会）达成协议，采纳EWF的焊接培训体系和相关的焊接人员培训规程。1995年IIW-Ⅶ委（国际焊接学会第七委）正式成立，专门负责IIW在世界范围内建立国际统一的焊接人员培训与资格认证体系的工作。经过几年的努力，到1998年9月这一体系已经正式在世界范围内开始实施和推广。

目前，按照这一培训体系进行的培训和资质认证的人员范围包括以下几类：

国际焊接工程师［International Welding Engineer（IWE）］；

国际焊接技术员［International Welding Technologist（IWT）］；

国际焊接技师［International Welding Specialist（IWS）］；

国际焊接技士［International Welding Practitioner（IWP）］；

国际焊接质检人员（International Welding Inspection Personnel）；

国际焊工（International Welder）。

1）国际焊接工程师　是ISO 14731（等同于欧洲标准EN719）所规定的最高层次的焊接技术人员和质量监督人员，是与焊接相关企业获得国际产品质量认证的要素之一。可以负责结构设计、生产管理、质量保证、研究和开发等各个领域的焊接技术工作，在企业中起着极其重要的作用。

2）国际焊接技术员　是介于焊接工程师和焊接技师之间的一类焊接技术人员和监督人员，他们可以负责结构设计、生产、质量保证、研究和开发等多个领域的焊接技术工作。

3）国际焊接技师　焊接技师是焊接企业中第三层次的焊接监督人员，其作为焊接监督人员主要适用于中、小型的焊接企业。这类人员在企业中的作用十分重要，他们既具有一定的理论知识，又具备实际操作技能和生产实践经验，可以辅助焊接工程师进行焊接技术的管理工作，起到焊工和焊接工程师之间的联系纽带作用。

4）国际焊接技士　焊接技士是取代德国原焊工教师这一层次的焊接人员，在某些地区将其称为“焊工领班”。他们不仅可作为焊工教师从事焊接培训工作，也可以作为企业中高层次的焊接技术工人协助焊接技师解决生产中的问题。焊接技士按焊接方法分为四类：即：气焊、手工电弧焊、钨极惰性气体保护焊和熔化极气体保护焊。

3　焊接培训在我国的发展情况

3.1　按国内相关标准及规程实施的焊接技术培训

（1）焊接技术人员

焊接技术人员在我国由高级工程师、工程师、助理工程师和焊接技术员四类人员构成，目前我国尚没有对焊接技术人员的培训标准及规程，仍然在采用由企业或主管机构进行的评聘制。即对专科以上的焊接专业毕业生根据其毕业的资质、工作的年限以及业务能力来对焊接技术人员进行评定及聘任。随着教育体制的改革，绝大部分专科以上高等院校均已取消了焊接专业，这对我国现有焊接技术人员的职称评聘提出了值得深思的课题。

（2）焊接技师

我国在1988年以前没有开展过对焊接技师的系统培训，各企业中的焊接技师是从技术全面、实践经验丰富，且在焊接工作中起带头作用的老工人师傅中考评晋升的。为了提高焊接技术工人的素质，我国于1988年起恢复了对焊接技师的培训及考核工作。由各省、市的劳动部门组织对企事业单位原八级的焊工进行培训，并按国家机械工业委员会制订的考规进行考评。1995年国家劳动部颁发了对“技师”和“高级技师”的职业技能鉴定规范。按照该规范由各省、市的劳动与社会保障厅（局）对企业中符合条件的焊接技术工人组织培训与考试。而事业单位则由各省、市的人事部门组织培训与考试。合格者颁发相应的焊接技师证书。

（3）焊工教师

焊工教师的正规培训在我国始于1984年，由机械工业哈尔滨焊接技术培训中心参照德国焊接学会（DVS）的“焊工教师培训与考试规程”、结合中国国情为国内部分行业的焊接培训机构及企业培养焊工教师队伍。培训方式采取实际技能操作与理论相结合，按教学大纲要求，作为一名合格的焊工教师不仅要具有全面过硬的实际操作技能，同时还应具



有将理论结合于实际并用来指导焊工操作的能力。这种规范化、系统化及标准化的焊工教师培训方式避免了过去师傅带徒弟的传授方式所造成的弊病，为焊工培训的规范化奠定了师资基础。

1987年5月中国焊接协会培训工作委员会成立后，将规范化的焊工教师培训工作在培委会的各培训中心站系统内进行推广及应用，取得了良好的效果。其他原国家部分部委所属的焊接培训机构按各自系统内的要求也开展了焊工教师的培训工作。

(4) 焊工

我国的焊工培训与国外发达国家相比起步较晚，以前企业的焊工培训采用的均是落后的、不规范的师傅带徒弟的方式，只是到了20世纪80年代才逐步建立起了系统化、规范化的焊工培训体系。

我国的焊工培训主要是由原国家各部委的企业及相关行业系统的焊接培训机构承担。例如：中国焊接协会培训工作委员会系统的培训机构，各省、市劳动与社会保障厅（局）设在各企业内的培训机构，各省、市质量与技术监督局设在各企业内的培训机构以及船检系统、电力系统、石化系统、冶金建设系统等的培训机构。被培训人员来自于各企事业单位以及社会上的待业人员等。培训一般根据被培训人员的具体要求，针对不同的焊接方法，不同的被焊材料、不同的焊接位置、以及不同的资格认证等级，按照相应的培训规程及考试标准进行培训和考试。焊工培训主要以技能操作为主、理论基础知识为辅，培训时间视不同的培训项目及需要而定，一般为1~3个月，经培训考试合格后颁发相应的资格证书。

我国的焊工资格认证机构均为颁发相关标准与规程的政府机构或部门，以及受政府机构或部门认可并授权的一些企业内具有培训能力与考试资格的焊接培训机构。由于焊工资格认证机构属于国家原各部委或不同行业，导致我国焊工培训及资格证书非常不统一、不规范，且种类繁多，重复重叠，互不认可。没有统一性和通用性，给企业造成极大负担。

3.2　引入国际上先进的焊接培训体系

与国际接轨的焊接技术培训工作在我国始于1984年，由中国和德国两国政府在焊接技术培训领域的合作项目——中德"哈尔滨焊接技术培训中心"与德国焊接学会（DVS）所属的杜伊斯堡焊接培训与研究所（SLV－Duisburg）按照德国焊接学会（DVS）的相关焊接培训规程进行了DVS焊工教师及DIN 8560焊工的培训及资格认证。20世纪90年代欧洲成立了欧洲焊接联合会（EWF）以后，哈尔滨焊接技术培训中心与德国杜伊斯堡焊接培训与研究所继续合作，按照德国及欧洲的焊接培训规程及标准，在我国继续开展了"欧洲焊接工程师"、"欧洲焊接技师"、"德国DVS焊工教师"以及"欧洲焊工"的培训。至1998年12月中德合作项目结束为止，在近14年的中德合作期间，共为国内各行各业培养了178名欧洲焊接工程师，125名欧洲焊接技师，836名德国DVS焊工教师以及5000多名德国及欧洲焊工。在这14年的中德合作期间，不仅为国内各行业培养了具有国际资质的焊接人员，也为国内各焊接企业走向国际市场提供了人才资源，同时更为重要的是：引进、吸收并采纳了德国及欧洲这一国际先进的焊接技术培训体系，并在全国范围内得到了推广、应用及认可。为我国的焊接培训体系与国际接轨奠定了坚实的基础。

3.3　焊接培训与国际接轨

在此基础之上，为使我国的焊接培训与资格认证体系早日实现与国际接轨，由中国焊接协会和中国机械工程学会焊接学会于1998年8月哈尔滨焊接技术培训中心，召开了全国焊接培训工作会议。决定向国际焊接学会提出申请，加入国际焊接人员培训与资格认证体系。

1999年9月7~9日，由国际焊接学会（IIW）的评审专家组在哈尔滨对CANB进行现场审查及验收，通过了对CANB的审查和被CANB首家授权的焊接培训机构（ATB）——哈尔滨焊接技术培训中心的考核，并受到国际焊接学会评审专家的高度评价。

2001年1月，在巴黎召开的国际焊接会议上，中国焊接人员培训与资格认证委员会——CANB获得IIW各会员国的一致通过。这标志着我国焊接培训与资格认证在全国各行业中率先与国际接轨。

4　国际焊接人员培训规程

4.1　国际焊接工程师、技术员、技师、技士（IWE/IWT/IWS/IWP）四类人员培训规程

这四类人员可以通过以下途径参加培训及考试，并颁发相应证书。

(1) 标准途径

1) 全课程培训　IWE、IWT、IWS、IWP。

2) 与高校合作　IWE、IWT、IWS。

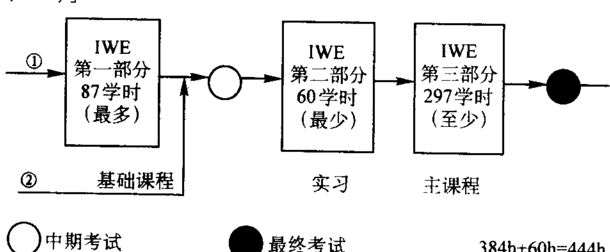
(2) 可选途径　IWE、IWT、IWS、IWP。

(3) 过渡期资格转换　IWE、IWT、IWS。

各种途径要求学员的入学条件是不一样的，所以每种途径的培训时间也不同，但最终的考试是统一标准。

4.1.1　标准途径

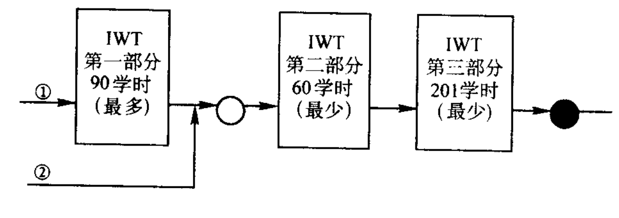
(1) 国际焊接工程师［International Welding Engineer (IWE)］



①毕业于四年制正规工科院校，并且已取得学士学位者。

②除满足①外，具备与第一部分相当的焊接专业基础知识并有相应证明的学员。

(2) 国际焊接技术员［International Welding Technologist (IWT)］

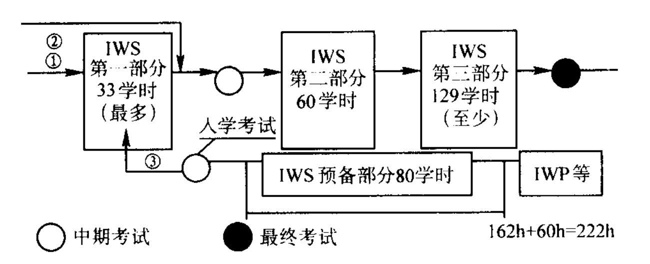


①应具有国家承认的工科大专学历，或具有本科工科毕业证书而无学士学位者。

②除满足①外，具备与第一部分相当的焊接专业基础知识并有相应证明的学员。

(3) 国际焊接技师［International Welding Specialist (IWS)］



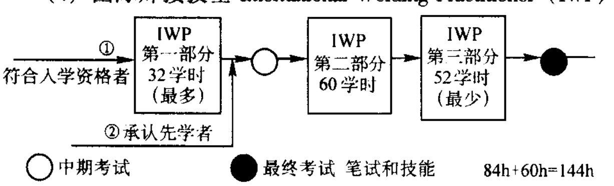


①学员应具有中专以上学历，25岁以上，至少有两年相关工作经历或具有国际焊接技士或欧洲焊工教师资格证书持有者。

②除满足①外，具备与第一部分相当的焊接专业基础知识并有相应证明的学员。

③具有国际焊接技士或欧洲焊工教师资格证书持有者或26岁以上，连续工作三年以上的高级熟练焊工，并建议参加IWS预备部分的学习，然后参加入学考试。

（4）国际焊接技士 International Welding Practitioner（IWP）



1）（A）持有效的焊工合格证者，具有ISO 9606－1中5.1所规定的焊接方法中的一个方法下的ISO 9606－1 H－L045 ss nb项目或等同的EN287－1中的H－L045 ss nb或ASME IX6G证书者；

或（B）跟IIW成员国等同效的板焊工，可根据EWF的指导规程：对MMA、MIG/MAG，TIG或氧－乙炔气焊，获其中一种方法的EN287－1PEss nb项目，或一种方法的EN287－1 PC＋PF ss nb两项目的合格证书者。

上述（A）、（B）中的证书须在焊工遵照焊接工艺规程和遵守安全操作许可的条件下由ATB监督获得。

2）在出示足够的所选该方法的理论知识的证明下由ANB同意者，如持有按EWF规程所获得的欧洲管焊工证书或在IIW成员国内等同的证书者。

3）年龄22岁以上至少有二年工作经验的焊工。

这四类人员的培训内容及时间如表8.3-1所示。

以上课程中所涉及基本原理外，大量涉及到了国际（ISO）、欧洲（EN）、美国（ASME）、德国（DIN）等标准和相关的规程。

表8.3-1　国际焊接技术人员的培训内容及时间　h

理论及技能培训内容	IWE	IWT	IWS	IWP
焊接工艺和设备	99	80	45	22
材料及材料的焊接行为	101	80	45	22
结构和设计	64	40	22	8
生产制造和工程应用	110	80	50	32
基本实践操作	60	60	60	60
合计	444	340	222	144

4.1.2　可选途径

可选途径允许那些拥有国际焊接学会相关培训规程所要求的教学大纲知识的人员且可证明他们实际能力的人，可不必参加ANB批准的培训课程而直接参加考试。目前，可以通过可选途径获得国际焊接学会技术资格的有：IWE、IWT、IWS、IWP和IWIP等5项课程。下面以国际焊接工程师（IWE）为例，说明可选途径实施的要求。如图8.3-1（可选途径入学条件与实施路径）所示。

（1）可选途径的申请材料和书面审查

申请者必须向ANB递交申请表，其内容包括：

① 符合入学条件的工科学士学位以上证书复印件；

② 一份包含职业信息的个人简历；

③ 至少有四年与焊接相关的工程师级的工作经验（在申请前6年的时间范围内）；

④ 申请者成为IWE的资质：工作经验、接受的培训及教育程度（也可包括其他的考试成绩）。

通过书面初步审查，ANB决定是否对申请者进行技术考核和可选途径的确认。

（2）技术考核和可选途径的确认

包括以下项目。

① 按相关评审表进行详细的书面技术考核。

② 至少2 h的口试以检验其对焊接的了解程度及应用能力。

完成这些要求后，申请者需在四周内完成宽范围的一个课程设计（以检验知识的合理应用）。课程设计完成后，学员要写出技术报告，并参加ANB组织的答辩。

ANB根据技术考核的结果，决定学员的可选途径，如直接参加最终考试、参加IWE课程的第一阶段、中期考试、第二阶段或第三阶段学习。但是，如果在口试后课程设计前，ANB认为应该终止技术考核，学员至少要参加标准课程中第四模块（生产制造与工程应用）的学习。

其中ANB技术考核如图8.3-2所示。

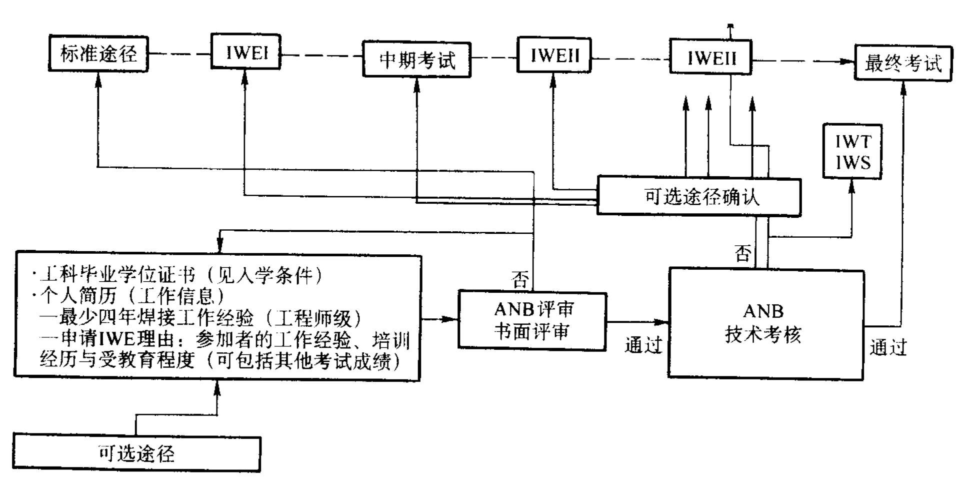


图8.3-1　可选途径的入学条件与实施路径



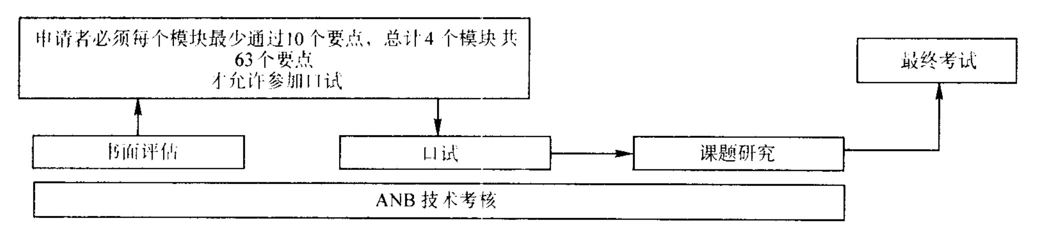


图 8.3-2 ANB 技术考核

ANB技术考核如上所述，技术考核分为三个阶段，即：书面考核、口试和课程设计

（3）最终考试

与标准培训途径的最终考试要求和程序相同。

4.1.3 过渡期资格转换

为了保护我国现已具备国内各类焊接资格人员的利益，到2003年底，现有各类焊接人员可以参加相应国际资格转换培训和认证。比如，工程师过渡期资格转换规程中规定，对国内本科以上焊接专业毕业，已具有工程师以上资格的人员，可参加至少84个学时的培训，通过相应考试后，可获得IWE证书。就省去了参加444个学时培训的繁琐，其他人员（IWT、IWS）的转换办法也都有相应的具体规定。这为我国焊接人员提供了非常难得的机会，各类人员在过渡期转换培训的时间见表8.3-2。

表 8.3-2 各类人员在过渡期转换培训时间 学时

内容 \ 层次	焊接工程师	焊接技术员	焊接技师
焊接工艺及设备	15	15	8
焊接材料及材料的焊接行为	24	24	10
焊接结构及设计	30	30	24
焊接生产及工程应用	24	30	16
实习及考试	12	12	12
总学时数	105（最少84）	105（最少84）	70（最少59）

4.1.4 IWE、IWT、IWS、IWP 四类人员考试

以国际焊接工程师课程考试为例介绍如下。

（1）考试资格认可

参加国际焊接工程师课程考试资格如下。

1）符合培训规程所述最低要求的人员。

2）接受根据本规程所规定的由CANB批准的课程培训，实际出勤率达到90%以上。

（2）考试程序与内容

为了检验学员知识及对焊接技术在不同条件下的理解能力。下面每个模块都包括笔试与口试。

① 焊接方法与设备。

② 焊接材料与行为。

③ 结构与设计。

④ 生产制造与工程应用。

1）笔试　为覆盖整个课程的一系列多项选择题，每一门课程的书面考试时间至少不低于2 h，四门课程不低于8 h。书面考试低于50分（含50）者不得参加口试。

2）口试　每一参加考试人员对涉及所有四门课的口试时间不少于1 h。口试与笔试同等重要，即口试的份量占该课程总成绩的50%。学员要通过考试，各科成绩至少达到60分。

IWE的口试是强制性的 IWT \ IWS \ IWP的口试是非强制性的，如果考委会决定进行口试，应在笔试前宣布，其成绩比重为50%。对于考试成绩在51～59分的课程，考生必须参加口试，每一课程的口试时间不得少于15 min。

每一门课程的合格成绩有效期为三年，所有四门课程的考试将在IWE II开始后的三年时间内完成。

（3）补考

最终考试中每门不及格的课都要补考，补考将在第一次考试后的15日～15个月内进行，如果第二次补考仍未通过，允许在第二次考试后的1～15个月内重考，第三次考试仍不及格，学员将重新注册，重修所有课程。

4.2 国际焊接质检人员和国际焊工（IWIP/IW）培训规程

4.2.1 国际焊工培训规程

理论培训及考试＋技能培训及考试 ——→ 国际焊工

特点如下。

① 利于培训、考试及资格认证的一体化。

② 提供了理论及技能培训内容及评估的方式。

③ 技能考试与ISO 9606相符。

④ 本规程提供了综合性强的理论知识与高水平操作技能相结合的，难度逐渐增加，并包括了ISO 9606在内的教学及考试体系。

（1）入学条件（见图8.3-3）

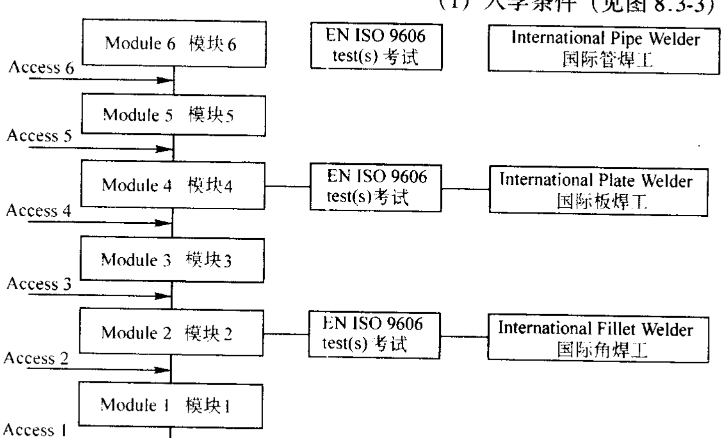


图 8.3-3 国际焊工入学条件

模块 1 条件　生理、心理健康，在金属加工中有足够的知识或教育，要达到参加课程的程度。

模块 2 的条件　通过模块 1 中描述的技能考试能证明达到了要求的技能水平。

模块 3 的条件　通过模块 2 中描述的理论和技能综合考试能证明达到了要求的技能水平。

模块 4 的条件　通过模块 2 中描述的理论和技能综合考试以及模块 3 中描述的技能考试，能证明达到了要求的技能水平。

模块 5 的条件　通过模块 2 和 4 中描述的理论和技能综合考试，能证明达到了要求的技能水平。

模块 6 的条件　通过模块 2 和 4 中描述的理论和技能综合考试以及模块 5 中描述的技能考试，能证明达到了要求的技能水平。

（2）课程设置（见图 8.3-4）

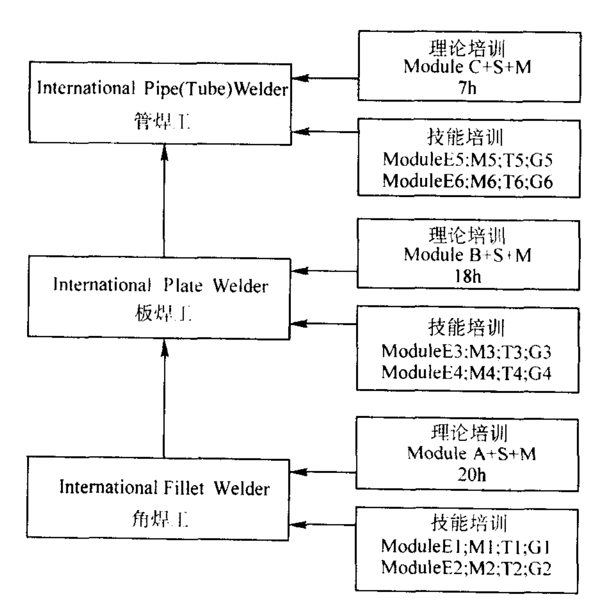


图 8.3-4　国际焊工课程设置

理论培训课程中，A、B、C 模块分别代表角焊工、板焊工及管焊工的理论教育基本内容，大体内容见表 8.3-3。

表 8.3-3　角焊工、板焊工及管焊工的理论教育基本内容

模块		内　容	学时数/h
A	A1	电弧焊中电的使用	2
	A2	焊接设备	2
	A3	健康与安全	2
	A4	制造车间的安全工作	2
	A5	焊接材料	4
	A6	焊接实践	2
	A7	焊接实践	2
	A8	焊接接头的准备方法	2
	A9	焊工资格认证	2
B	B1	钢的介绍	2
	B2	板的焊接接头	2
	B3	钢的可焊性	2
	B4	收缩、残余应力和变形	2
	B5	焊接缺陷	4
	B6	熔化焊方法概述	2
	B7	现场安全操作	2
	B8	监督与检验	2
	B9	焊接中的质量保证（QA）	2
C	C1	管的焊接接头	2
	C2	非合金钢以外的材料	2
	C3	失效概述及其原因	2
	C4	国际焊接标准	1

另外：针对专门的焊接方法，需补充模块 S 内容，具体为：

SG：气焊补充理论教学　（5 h）

SA：MMA 焊接补充理论教学　（5 h）

SM：MIG/MAG 焊接补充理论教学　（7 h）

ST：TIG 焊接补充理论教学　（5 h）

针对不锈钢和 Al 焊接，需补充模块 M 内容，具体为：

MSS：不锈钢补充理论教学　（8 h）

MAL：铝补充理论教学　（8 h）

（3）技能培训课程

E1—E6 为对不同程度的手工焊（111）焊工技能培训的具体要求教学模块；

M1—M6 为对不同程度的气保焊（131，135）焊工技能培训的具体要求教学模块；

T1—T6 为对不同程度的钨极氩弧焊（141）焊工技能培训的具体要求教学模块；

G1—G2 为对不同程度的气焊（311）焊工技能培训的具体要求教学模块。

（4）考试及证书

在模块 A、B、C 之后，有一次最终考试，由选择题组成，最终理论考试通过线为 60 分，可获取相关证书。理论部分考试失败需参加相应部分的补考。再次失败需重新学习。

根据 ISO 9606 验收准则，技能考试通过标准为“及格”。

根据本培训规程所学习的理论知识及考试成绩在五年内有效。但特殊材料与工艺需另学习与考试。

ANB 将向那些理论考试与技能考试均合格的学员颁发证书，证书将包含其所允许的执业范围。

4.2.2　ISO 9606（EN287）熔化焊焊工考试标准

（1）前言

欧洲熔化焊焊工考试标准于 1992 年 2 月开始实施，同时取代了德国的 DIN 8560 和 DIN8561 两个焊工考试标准，该标准于 1994 年被直接转化为国际标准，即 ISO 9606。该标准系列为：

ISO 9606 - 1（EN287 - 1）：焊工考试—钢材

ISO 9606 - 2（EN287 - 2）：焊工考试—铝及铝合金

ISO 9606 - 3（EN287 - 3）：焊工考试—铜及铜合金

ISO 9606 - 4（EN287 - 4）：焊工考试—镍及镍合金

ISO 9606 - 5（EN287 - 5）：焊工考试—钛及钛合金

另外，其他焊工的考试标准为 prEN ISO 15618 - 1（水下焊工考试：T1 水下湿法焊工）；prEN ISO 15618 - 2（水下焊工考试：T2 水下干法焊工）。

下面仅以 EN287（ISO 9606 - 1）为例作一介绍。

（2）目的及应用范围



ISO 9606 标准适用于手工及半自动焊焊工的考核，而不适用于自动焊焊工的考核，自动焊焊工考试标准为 ISO 14732（EN1418）。本标准侧重于焊工手工操作技能的考核，而对焊工的专业理论考核没有做硬性的规定，这主要取决于各行业部门的具体要求。

(3) 焊接方法

本标准中所列出的焊接方法如下。

111——手工电弧焊；

114——药芯焊条电弧焊（没有保护气体）；

12——埋弧焊；

131——惰性气体保护焊（MIG）；

135——活性气体保护焊（MAG）；

136——药芯焊丝活性气体保护焊；

141——钨极氩弧焊；

15——等离子焊；

311——氧－乙炔火焰气焊。

(4) 材料

为减少焊工考试项目，特对被焊材料进行了分类组合。

1) 钢材分类组别

W01 组：低碳（碳－锰）钢及低合金钢，该组别中还包括屈服极限 ReH≤355 N/mm² 的细晶粒结构钢。

W02 组：铬－钼（CrMo）钢及抗蠕变铬钼钒（CrMoV）钢。

W03 组：屈服极限 ReH > 355 N/mm² 的正火、调质和机械热处理的细晶粒结构钢，以及相近的适于焊接的镍钢（镍含量为 2%～5%）。

W04 组：铬含量为 12%～20% 的铁素体或马氏体不锈钢。

W11 组：铁素体－奥氏体或纯奥体铬镍（CrNi）不锈钢。

2) 钢材组别的适用范围（见表 8.3-4）

表 8.3-4　钢材组别的适用范围

试件材料组别	适用范围				
	W01	W02	W03	W04	W11
W01	*	–	–	–	–
W02	×	*	–	–	–
W03	×	×	*	–	–
W04	×	×	–	*	–
W11	×[①]	×[①]	×[①]	×[①]	*

① 采用 W11 组焊接填充材料。

3) 不同钢材组别焊接接头的适用范围（见表 8.3-5）

表 8.3-5　不同钢材组别焊接接头的适用范围

试件材料组别	被焊材料的适用范围
W04	W04 与 W02 W04 与 W01 W02 与 W01
W03	W03 与 W02 W03 与 W01 W02 与 W01
W02	W02 与 W01

注：1. 不同材料组焊接时（异种材料焊接接头）应采用化学成分与其中一个材料组一致的焊接填充材料。
2. 如果焊接填充材料的化学成分与 W11 组母材相符并适合于这种接头、W11 组的母材可以与 W01～W04 组母材焊接。

(5) 填充材料和辅助材料

大多数焊工考试使用的焊接填充材料的化学成分与母材材料组一致。如果采用适合其材料组的一种填充材料，保护气体或焊剂进行焊工考试，则焊工可以使用对这一材料组的所有其他填充材料，保护气体或焊剂。

表 8.3-6 为焊条药皮类型适用范围。

表 8.3-6　焊条药皮类型适用范围

焊条药皮类型	适用范围				
	A；RA	R；RB；RC；RR	B	C	S
A；RA	*	–	–	–	–
R；RB；RC；RR	×	*	–	–	–
B	×	×	*	–	–
C	–	–	–	*	–
S[①]		–	–	–	*

① S 仅适用于考试时使用特种焊条的情况。

注：* 表示使用此种类型的手工电弧焊焊条进行考试；× 表示考试对其同样适用的焊条；– 表示考试对其不能适用的焊条。

(6) 试件尺寸及适用范围

1) 考试试件的形状和尺寸

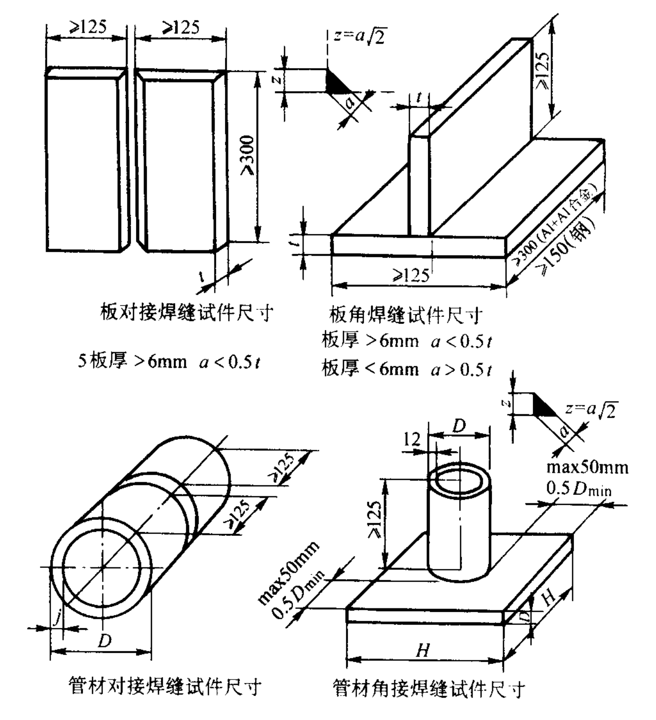


图 8.3-5　考试试件的形状和尺寸

2) 钢材焊接试件厚度及适用范围（见表 8.3-7）

3) 钢材焊接管件的直径及适用范围（见表 8.3-8）

(7) 焊接位置

表 8.3-7　钢材焊接试件厚度及适用范围

板厚或管壁厚 t	
试件/mm	适用范围
≤3	t～$2t$[①]
（<3）～（≤12）	3 mm～$2t$[②]
>12	≥5 mm

① 对于气焊（311）：t～$1.5t$。

② 对于气焊（311）：3 mm～$1.5t$。



表 8.3-8 钢材焊接管件的直径及适用范围

管径 D	
试件 mm	适用范围
≤25	$D\sim2D$
>25~≤150	$0.5D\sim2D$（最小 25 mm）
>150	≥$0.5D$

焊接位置的表示方法按 ISO 6947 标准进行表示焊接位置的替代关系见表 8.3-9。

(8) 其他替代关系（见表 8.3-10）

① 管对接焊缝的考试可以替代板对接焊缝考试。

② 板对接焊缝的考试可替代相应焊接位置的外径 ≥500 mm 的管的对接焊缝考试。

表 8.3-9 焊接位置的适用范围

试件焊接位置					适用范围																								
					板对接焊缝					板角焊缝					管对接焊缝						管角焊缝				
															管子轴线和角度										
															转动	固定					转动	①	固定		
																0°		90°	45°		45°		0°		90°
					PA	PC	PG	PF	PE	PA	PB	PG	PF	PD	PA	PG	PF	PC	H-L045	J-L045	PA	PB	PG	PF	PD②
板	对接焊缝			PA	□					×	×				×						×	×			
板	对接焊缝			PC	×	□				×	×				×			×			×	×			
板	对接焊缝			PG			□					×													
板	对接焊缝			PF	×			□		×	×		×		×						×	×		×	
板	对接焊缝			PE	×	×		×	□	×	×		×	×	×						×	×		×	×
板	角接焊缝			PA						△											×				
板	角接焊缝			PB						×	△										×	×			
板	角接焊缝			PG								△													
板	角接焊缝			PF						×	×		△								×	×			
板	角接焊缝			PD						×	×		×	△							×	×			×
管	对接焊缝	管子轴线和角度	转动 0°	PA	×					×	×				○						×	×			
管	对接焊缝	管子轴线和角度	固定 0°	PG			×					×				○							×		
管	对接焊缝	管子轴线和角度	固定 0°	PF	×			×	×	×	×		×	×	×		○				×	×		×	×
管	对接焊缝	管子轴线和角度	固定 90°	PC	×	×				×	×				×			○			×	×			
管	对接焊缝	管子轴线和角度	固定 45°	H-L045	×	×		×	×	×	×		×	×	×		×	×	○		×	×		×	×
管	对接焊缝	管子轴线和角度	固定 45°	J-L045			×					×				×				○			×		
管	角焊缝管板	管子轴线和角度	转动 45°	PA						×											回				
管	角焊缝管板	管子轴线和角度	①	PB						×	×										×	回			
管	角焊缝管板	管子轴线和角度	固定 0°	PG								×											回		
管	角焊缝管板	管子轴线和角度	固定 0°	PF						×	×		×	×						×	×			回	×

注：□—板对接试件考试合格；△—板角接试件考试合格；○—管对接试件考试合格；回—管板角接试件考试合格；×—考试合格项目替代范围。

① 管 PB 有二种形式（管水平转动、管垂直固定）。

② 可由其他相应位置的考试代替。

表 8.3-10 试件类型和接头形式的适用范围

考试焊缝施焊				焊工允许的使用范围					
				板材对接焊缝				管材对接焊缝	
				单面焊		双面焊		单面焊	
				加垫板 (mb)	不加垫板 (nb)	清根 (gg)	不清根 (ng)	加垫板 (mb)	不加垫板 (nb)
板材对接焊缝	单面焊	加垫板	mb	*	-	×	-	①	-
板材对接焊缝	单面焊	不加垫板	nb	×	*	×	×	①	①
板材对接焊缝	双面焊	清根	gg	×	-	*	-	①	-
板材对接焊缝	双面焊	不清根	ng	×	-	×	*	①	-



续表 8.3-10

考试焊缝施焊				焊工允许的使用范围					
				板材对接焊缝				管材对接焊缝	
				单面焊		双面焊		单面焊	
				加垫板（mb）	不加垫板（nb）	清根（gg）	不清根（ng）	加垫板（mb）	不加垫板（nb）
管材对接焊缝	单面焊	加垫板	mb	×	–	×	–	*	–
		不加垫板	nb	×	×	×	×	×	*

① 见（8）中②、③。

注：* —考试焊接的焊缝；× —考试对这种焊缝也适用；– —考试对这种焊缝不适用。

③ 平焊位置（PA）或横焊位置（PC）的板的对接焊缝考试可以替代相同位置的外径≥150 mm 管对接焊缝考试。

④ 单面无垫板焊接适用于加垫板焊接，也适用于清根或不清根的双面焊。

⑤ 板或管加垫板焊接适用于双面焊接，但不适用于无垫板焊接。

⑥ 如果在相同条件下焊接，对接焊缝焊接适用于角焊缝焊接。如果在生产中绝大多数是角焊缝焊接，则建议焊工进行相应的角焊缝考试。

（9）焊接条件

关于母材、焊接填充材料、焊接方法、坡口准备、焊接位置以及焊缝种类等考试条件应同生产相符。试件焊接时间应与实际生产中施焊时间一致。所有试件的根部焊缝和盖面焊缝在检验长度内必须有一处接头。

（10）检验方法

每个试件均做外观检验。射线检验（厚度≥12 mm 的铁素体材料可用超声波代替）或断裂试验可任选一种。如果选择射线检验，则对 131（MIG），135（MAG）和 311（G）方法要求附加弯曲试验。钢材检验方法见表 8.3-11。

表 8.3-11　钢材检验方法

检验方法	管对接焊缝	板对接焊缝	角焊缝
外观检验	×	×	×
射线检验	×①⑤	×①⑤	–
弯曲试验	×②	×②	–
断裂试验	×①	×①	×③④
宏观金相	–	–	×④
磁粉着色探伤	–	–	–

① 应进行射线检验或者断裂试验，但不是二者都做。

② 如果进行射线检验仅对 131、135 和 311 方法要求附加弯曲试验。

③ 如果考核人员/部门提出要求，则用磁粉/着色探伤对断裂试验加以补充。

④ 允许用至少 4 个宏观金相试样代替断裂试验。

⑤ 铁素体钢试件厚度大于 12 mm 时，射线检验可以用超声检验替代。

（11）破坏性检验

如果选择断裂试验代替射线或超声波检验，对板对接及角接焊缝其检验长度不包括试板两端的各 25 mm 处，断裂试验的试件至少为正、反两块试件。建议在断裂试验以前应将试样正面、背面余高磨平，整个检验长度可以分成多个试样。试样两边用锯或铣削开最深 5 mm 的切口，但试样上的试验长度至少为 40 mm。

如果决定采用射线检验，对 131（MIG），135（MAG）和 311（G）焊接方法必须按 ISO 5173 标准加横向弯曲试验。要求做两个背弯和两个面弯。除非对母材有其他极限值要求处，弯曲心轴直径为 $4t$ 时，弯曲角度必须达到 120°。板厚≥12 mm 时，横向弯曲试样可由 4 个按 ISO 5177 标准加工的侧弯试样代替。

角焊缝试件可以分成若干个断裂试样，但应保证断裂位置在焊缝上。

（12）试件的评定条件

试件要根据适于每种缺陷的评定条件进行检查。完整的缺陷说明包括在 EN 26520 中。对于本标准适用的并通过相应检验方法发现缺陷的评定条件，如果没有其他规定，必须与 EN 25817 相一致。如果试件中的缺陷在 EN 25817 的评定级别 B 规定的界限内，则焊工通过考试。例外的缺陷情况：对于过大的焊缝余高（对接），过高的焊缝余高（角焊缝），过大的角焊缝厚度，过大的根部余高，则评定级别 C 对其适用。

如果在焊工的试件中发现的缺陷超过允许的最高限值，则视此焊工未通过考试。

对无损检验也应采用相应的评定标准。

对于破坏性检验和无损检验，要使用规定的方法进行。

（13）补考

如果明显看到，试件的失效是由于金属冶金或其他外界因素造成的，而不是直接由于焊工的手工技能造成的，则有必要进行一次附加的考试或一个试件来确定新的试验材料的可焊性和新的试验条件的适宜性。

（14）有效期

1）初次考试　焊工考试的有效期从通过考试之日算起。这一日期可以同证书上给出的发证日期有所区别。

焊工考试有效期为两年，前提条件是满足下列条件并且每六个月由雇主或监督人员在相应证书上予以认可。

① 焊工必须尽可能经常地在适用的考试范围内从事焊接工作，最长允许 6 个月的间断时间。

② 焊工的工作一般要与考试时的技术条件一致。

③ 没有充足理由怀疑焊工的手工技能和理论知识。

如果其中一个条件没满足，则焊工考试视为无效。

2）延期　下列每项条件均得到满足时，则焊工考试的有效期可以在原来的适用范围内延长两年。

焊工焊出的实际生产焊缝达到相应的质量要求。

检验报告，如射线或超声波检验、断口检验报告或负责的监督人员的报告要与焊工的证书形成文件共同保存至少六个月供查阅。

考官或考核单位要检查前面提到的条件是否符合并在焊工证书上签字认可延期。

4.2.3　国际焊接检验人员培训

（1）检验人员层次

① 综合级（IWI C）。

② 标准级（IWI S）。

③ 基础级（IWI B）。



（2）入学途径（教育和考试）（见图 8.3-6 标准途径，图 8.3-7 可选途径）

途径 1：适用于那些满足各层次人员入学条件的学员。学员可在先期学习和工作经验基础上进行自我评估，可直接进行中期考试，或是先参加焊接技术模块部分学习。进入焊接检验模块学习前学员必须通过中期考试。

途径 2：适用于那些已获 IIW 资格证书的人员，可直接进入相应级别的焊接检验模块部分学习。

在途径 3 中，对于 IWI－S 级检验人员的入学，可不必完全满足途径 1 中规定的入学条件，但必须具备普通工程检验 5 年以上的检验工作经验。这些检验人员通过自我评估，决定是否直接参加模块 0 后的第一个中期考试，或是参加模块 0 中 40 学时的基本技术学习。焊接技术模块 WT II 部分对于途径 3 是强制实行的。

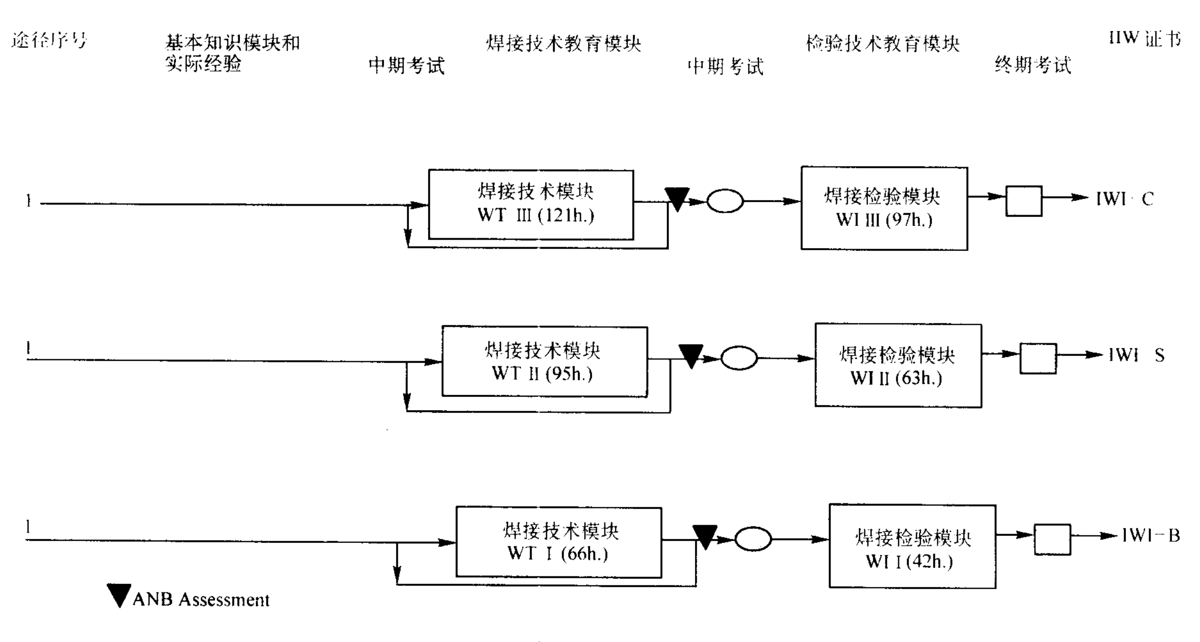


图 8.3-6 国际焊接检验人员入学标准途径

可选途径

途径序号　基本知识模块和实际经验　中期考试　焊接技术教育模块　中期考试　检验技术教育模块　终期考试　IIW 证书

2 IWT Diploma

焊接技术模块 WT III (121h.)　焊接检验模块 WI III (97h.)　IWI－C

24 个月经验

3 60 个月经验　模块 0 (40h)　焊接技术模块 WT II (95h.)　焊接检验模块 WI II (63h.)　IWI－S

2 IWS Diploma

4 IWP证书　24 个月经验

焊接检验模块 WI I (42h.)　IWI－B

* A single examination but module WT II is compulsory for Roure 3, optional for Route 4.

图 8.3-7 国际焊接检验人员入学可选途径



本规程同时规定了图表中有丰富经验的 IWI－B 级检验人员 经途径 4 入学 IWI－S 级。学员可通过自我评估，决定是参加特定，或是全部模块学习。中期考试将检查学员的知识，考试失败者必须参加模块 0 与 WT II 的学习。

对于所有途径，如果学员直接参加某次中期考试失败，则必须参加在所参加考试前模块部分的培训。

（3）NDT 资格证书的互认

那些根据 ISO 9712、EN 473 或 ANB 认可的等同标准考试获得 NDT 资格证书持有者，可免去焊接检验模块相应 NDT 检验方法部分的学习，但必须参加最终考试。这样的安排需经 ANB 批准。

（4）检验人员的职责

一个质检人员的典型的职责如下。

① 解释制图和规范参数。

② 核实焊接工艺和焊工或焊接操作者资格。

③ 核查批准的焊接工艺的应用情况。

④ 选择生产检验试样。

⑤ 解释检验结果。

⑥ 准备报告的保存记录。

⑦ 程序的准备。

⑧ 检查结束方法的正确应用。

在定义质检人员的责任时，赋予其下令停止作业或要求立即采取补救措施以解决焊接中的质量问题的权力。

（5）课程设置（见表 8.3-12 和表 8.3-13）

表 8.3-12　焊接教育模块　　学时

教学内容	IWI C	IWI S	IWI B
1）焊接工艺和设备	26	16	14
2）材料及材料的焊接行为	52	41	25
3）焊接结构设计	21	17	12
4）焊接生产制造	22	21	15
总学时数	121	95	66

表 8.3-13　焊接检验模块　　学时

教学内容	IWI C	IWI S	IWI B
1）焊接检验概述	3	3	2
2）试验	1	1	1
3）焊接缺陷	7	5	3
4）检验方法	31	25	20
5）质量保证	3	3	1
6）检验工作管理	3	3	0
7）实际操作	49	23	15
总学时数	97	63	42

（6）考试

考试分为三部分：

第一部分为专业面试，主要检查学员对标准、法规、质量文件的理解能力；

第二部分为笔试，包括课程各个部分；

第三部分为技能考试，检验学员对检验技术应用能力。

表 8.3-14 为考试时间最低要求。

表 8.3-14　考试时间最低要求　　h

考试内容	时间		
	IWI C	IWI S	IWI B
第一部分　专业面试	0.5	0.5	0
第二部分　理论考试	3	2.5	1.5
第三部分　操作考试	2	2	2

5　我国国内焊接人员培训及考试部分规程

5.1　中国职业焊接技能鉴定规范

5.1.1　初级电焊工职业技能鉴定

（1）鉴定目标

初级电焊工应具备电弧焊、气割方面的技术及相关的安全知识；仅能从事静载荷构件和一般钢结构产品的焊接或气割工作，是晋升中级电焊工的基本力量。

（2）申报资格

1）文化程度　初中毕业。

2）现有技术等级证书（或资格证书）的级别　学徒期满。

3）本工种工作年限　三年以上。

4）身体状况　健康。

5）无技术等级证明，可参加初级电焊工的培训与考试，合格后方可申报。

（3）鉴定考试

按原国家劳动部和机械部组织制定的电焊工《国家职业技能鉴定规范》（考核大纲）规定进行，鉴定考试分操作技能考试和理论知识笔试两部分。每部分满分 100 分，60 分为及格。

1）理论知识内容

① 识图知识。

② 常用金属材料一般知识。

③ 金属学及热处理一般知识。

④ 电工常识。

⑤ 焊接电弧及弧焊电源知识。

⑥ 常用电弧焊工艺知识。

⑦ 常用焊接材料知识。

⑧ 焊接接头和焊缝形式知识。

⑨ 碳弧气刨知识。

⑩ 焊接用工、夹具及辅助设备知识。

⑪ 钳工基本知识。

⑫ 相关工种一般工艺知识。

2）操作技术鉴定内容　鉴定考试结合工矿、企事业单位实际生产需求确定不同的焊接方法。分别进行手工电弧焊、气焊、手工钨极氩弧焊、二氧化碳气体保护半自动焊和埋弧自动焊等方法考试。鉴定项目应包括板、大径管（或小径管）和管板三种试件形式。培训和考试项目见表 8.3-15 和表 8.3-16。

3）鉴定考试由当地劳动部门组织和监督

4）补考

① 理论考试不合格者应在一周内补考，补考合格后才准予参加技能操作考试，补考不合格者需重新参加培训。

② 技能操作考试不合格者需在三个月内补考，补考不合格者需重新培训。

（4）证书

1）证书内容由被授权的职业技能鉴定机构考评委员会填写。



2）证书由当地劳动主管部门负责验证。

3）鉴定考试合格者可获得初级电焊工证书，按国家有关规定享受相应待遇。

4）持证有效期按国家劳动部标准执行。

表 8.3-15　初级电焊工操作技能培训项目　mm

序号	初级工培训项目	图　示
1	板角接平角焊、立角焊 板材：16Mn，Q235 规格：10×150×300，10×75×300	
2	板 V 形坡口对接平焊、横焊 材质：16Mn，Q235 规格：12×150×300	
3	大径管水平转动平焊 管材：20 钢 规格：ϕ133×10	
4	插入式管板俯位 板：16Mn，10×150×150 管：20 钢，ϕ60×5	

表 8.3-16　初级电焊工操作技能鉴定考试试件形式和焊接位置　mm

序号	初级工鉴定项目	图　示
1	板 V 形坡口对接平焊 材质：16MnR，Q235 规格：12×150×300	
2	板 V 形坡口对接横焊 材质：16MnR，Q235 规格：12×150×300	
3	大径管对接水平焊（转动管） 管材：20 钢 规格：133×10	
4	插入式管板垂直俯位 板：16Mn，10×150×150 管：20 钢，ϕ60×5	

5.1.2　中级电焊工职业技能鉴定

（1）鉴定目标

中级电焊工应熟练地焊接常用材料的各种结构，完成动载荷和特殊要求产品的焊接、切割工作；能够发现生产中的不安全因素；是晋升高级电焊工的后备力量。

（2）申报资格

1）文化程度　初中毕业。

2）现有技术等级证书（或资格证书）的级别　初级工等级证书。

3）本工种工作年限　五年以上。

4）身体状况　健康。

5）不具有初级工等级证书者，可参加中级电焊工预备班培训，达到按中级电焊工标准要求的理论知识和操作技能考试合格后，方可申报。

（3）鉴定考试

按国家劳动部和机械部组织制定的电焊工《国家职业技能鉴定规范》（考核大纲）规定进行，鉴定考试分操作技能考试和理论知识笔试两部分。每部分满分 100 分，60 分为及格。

1）理论知识鉴定内容

① 基础知识

a. 金属学及热处理

b. 电工基础知识

② 专业知识

a. 焊接电弧及焊接冶金

b. 焊接工艺及设备专业知识

c. 常用金属材料焊接专业知识

d. 焊接应力和变形专业知识

e. 焊接检验专业知识

③ 相关知识

a. 机械加工常识

b. 相关工种工艺知识

c. 生产技术管理知识

2）操作技能鉴定内容　鉴定考试结合工矿、企事业单位实际生产需求确定不同焊接方法，可分别进行手工电弧焊、气焊、手工钨极氩弧焊、二氧化碳气体保护半自动焊和埋弧自动焊等方法考试。鉴定项目应包括板、大径管（或小径管）和管板三种试件形式。分不同项目进行焊接。培训和考试项目见表 8.3-17 和表 8.3-18。

表 8.3-17　中级电焊工操作技能培训项目　mm

序号	中级工培训项目	图　示
1	板角接平角焊 板材：16MnR，Q235 规格：10×150×300，10×75×300	
2	板 V 形坡口对接平焊、横焊、立焊 材质：16MnR，Q235 规格：12×150×300	
3	大径管对接水平固定、垂直固定 管材：20 钢 规格：ϕ133×10	
4	骑座式管板水平固定、垂直俯位 板：16MnR，10×125×125 管：20 钢，ϕ60×5	



表 8.3-18　中级电焊工操作技能鉴定考试试件形式和焊接位置　mm

序号	中级工鉴定项目	图　示
1	V形坡口中厚板横焊 材质：16MnR，Q235 规格：12×150×300	
2	V型坡口中厚板立焊 材质：16MnR，Q235 规格：12×150×300	
3	大直径管对接垂直固定焊（TIG焊为小直径管） 材质：20钢 规格：ϕ133×10	
4	骑座式管板垂直俯位或水平固定 材质：16MnR/20钢 规格：10×125×125/ϕ60×5	

3）鉴定考试由当地劳动部门组织和监督，在电焊工职业技能鉴定所进行，在选择项目的难易程度上不低于国家职业技能鉴定规范中的要求，试件评定应按《锅炉及压力容器焊工考试规则》中所规定的检验要求进行。

4）补考

① 理论考试不合格者应在一周内补考，补考合格后才准予参加技能操作考试，补考不合格需重新参加培训。

② 技能操作考试不合格者需在三个月内补考，补考不合格者需重新培训。

（4）证书

1）证书内容由被授权的职业技能鉴定机构考评委员会填写。

2）证书由当地劳动主管部门负责验证。

3）鉴定考试合格者可获得中级电焊工证书，按国家有关规定享受相应待遇。

4）持证有效期按国家劳动部标准执行。

5.1.3　高级电焊工职业技能鉴定

（1）鉴定目标

高级电焊工是焊接技术骨干，具有较高操作技能水平；能够分析焊接缺陷事故的产生原因；具有指导初、中级电焊工在技能操作方面的能力；是晋升焊接技师的后备队。

（2）申报资格

1）文化程度　初中毕业。

2）现有技术等级证书（或资格证书）的级别　中级工等级证书。

3）本工种工作年限　八年以上，技工学校和职业高中本专业（工种）毕业生申报高级工为三年以上。

4）身体状况　健康。

5）不具有中级工等级证书者，可参加高级电焊工预备班培训，达到按中级电焊工标准的理论知识和操作技能考试合格后，方可申报。

表 8.3-19　高级电焊工操作技能培训项目　mm

序号	高级工培训项目	图　示
1	V形坡口中厚板异种钢的对接横焊或立焊位置手工电弧焊 材质：16MnR、Q235/1Cr18Ni9Ti 规格：12×150×300	
2	V形坡口中厚板对接仰焊位置手工电弧焊 材质：16MnR，Q235 规格：12×150×300	
3	大直径管对接水平、垂直固定位置氩弧焊打底手弧焊填充盖面 材质：20钢 规格：ϕ133×10	
4	小直径管对接水平、垂直固定位置氩弧焊或手弧焊 材质：20钢 规格：ϕ60×5	
5	骑座式管板垂直仰位手弧焊或气体保护焊（至少三种试件形式，1、2中任选一项，1、2用气体保护焊时需为薄板） 材质：16MnR/20钢 规格：10×125×125/ϕ60×5	

表 8.3-20　高级电焊工操作技能鉴定考试试件形式和焊接位置　mm

序号	鉴定内容	图　示
1	板角接仰焊（手工电弧焊） 材质：16MnR，Q235 规格：12×150×300	
2	板对接仰焊或异种钢横焊、立焊（手工电弧焊） 材　质：16MnR，Q235/1Cr18Ni9Ti 规格：12×150×300	
3	大直径管对接水平、垂直固定位置（手工电弧焊或气体保护焊） 材质：20钢 规格：ϕ133×10	

续表 8.3-20

序号	鉴定内容	图示
4	小直径管对接水平、垂直固定位置（手工电弧焊或气体保护焊） 材质：20钢 规格：$\phi60\times5$	
5	骑座式垂直仰位、水平固定（手工电弧焊或气体保护焊） 材质：16MnR/20钢 规格：$10\times125\times125/\phi60\times5$	

(3) 鉴定考试

按国家劳动部和机械部组织制定的电焊《国家职业技能鉴定规范》（考核大纲）规定进行，鉴定考试分操作技能考试和理论知识笔试两部分。每部分满分100分，60分为及格。

1) 理论知识鉴定内容

① 基本知识　焊接接头试验方法。

② 专业知识　异种金属的焊接；典型金属结构的焊接。

③相关知识　提高劳动生产率的措施。

2) 操作技能鉴定内容　鉴定考试结合工矿、企事业单位实际生产需求确定焊接方法和鉴定项目。可分别选择手工电弧焊、气焊、手工钨极氩弧焊、二氧化碳气体保护半自动焊和埋弧自动焊等不同焊接方法。鉴定项目应包括板、小径管、大径管和管板四种试件形式。其项目见表8.3-19和表8.3-20。

3) 鉴定考试由当地劳动部门组织和监督，在电焊工职业技能鉴定所进行，在选择项目的难易程度上不低于国家职业技能鉴定规范中的要求，试件评定应按《锅炉及压力容器焊工考试规则》中规定的检验要求进行。

4) 补考

① 理论考试不合格者应在一周内补考，补考合格后才准予参加技能操作考试，补考不合格需重新参加培训。

② 技能操作考试不合格者需在三个月内补考，补考不合格者需重新培训。

(4) 证书

1) 证书内容由被授权的职业技能鉴定机构考评委员会填写。

2) 证书由当地劳动主管部门负责验证。

3) 鉴定考试合格者可获得高级电焊工证书，按国家有关规定享受相应待遇。

4) 持证有效期按国家劳动部标准执行。

5.1.4 焊接技师培训与考核

(1) 培训与鉴定目标

焊接技师是高级电焊工中的技术骨干和带头人，具有丰富的生产实践经验和解决生产技术关键问题的能力；能够传授技艺，培训初、中、高级电焊工。

(2) 培训与鉴定资格

1) 文化程度　高中或技工学校文化程度。

2) 具有高级电焊工的专业技术理论水平和实际操作技能，现有高级工等级证书。

3) 不具有高级等级证书者，可参加焊接技师预备班培训，达到按高级焊工标准的理论知识和操作技能考试合格后，方可申报。

4) 身体状况　健康。

(3) 鉴定考试

按国务院批准，劳动人事部发布的《关于实行技师聘任制的暂行规定》要求，申报者在已达到高级电焊工水平（获高级电焊工资格证书）条件下，进行工作业绩答辩考核，满分为100分，60分为及格。

1) 个人书面技术总结

① 业务能力。

② 特技专业。

③ 解决的关键难题。

④ 技术革新成果。

⑤ 授课带徒。

2) 答辨内容

① 按高级电焊工标准要求，根据答辩内容及其在生产实际中的使用价值、专业知识掌握情况、分析能力、表达能力和创造性，反映出实际水平。

② 针对技术总结，结合本焊接工种工艺中的难点、回答工艺理论及在实践中的解决办法。

③ 鉴定考试由当地劳动部门组织和监督。

(4) 证书

1) 证书内容由被授权的职业技能鉴定机构考评委员会填写。

2) 证书由当地劳动主管部门负责验证。

3) 鉴定考试合格者可获得焊接技师证书，按国家有关规定享受相应待遇。

4) 持证有效期按国家劳动部标准执行。

5.2 我国锅炉压力容器管道焊工考试与管理规则

5.2.1 培训目标

根据《锅炉压力容器安全监察暂行条例》、《压力管道安全管理与监察规定》，为加强焊工管理工作，保证锅炉、压力容器（含气瓶，下同）和压力管道的焊接质量，制定本规则。

5.2.2 适用范围

适用于各类钢制锅炉、压力容器和压力管道受压元件焊接的焊工考试，主要包括：受压元件焊缝；与受压元件相焊的焊缝；熔入永久焊缝内的定位焊缝；受压元件母材表面堆焊。

其他设备的焊工考试可参照本规则。钢制锅炉、压力容器和压力管道的焊条电弧焊、气焊、钨极气体保护焊、熔化极气体保护焊、埋弧焊、电渣焊、摩擦焊和螺柱焊等方法的焊工考试及管理应符合本规则要求；钛和铝材的焊工考试内容、方法和结果评定分别按JB 4745《钛制压力容器》和JB 4734《铝制压力容器》中的规定；铜和镍材的焊工考试内容、方法和结果评定按GB 50236《现场设备工业管道焊接工程施工及验收规范》中的规定。钛、铝、铜和镍材料焊工考试的组织、监督、发证和持证焊工的管理按本规则规定执行。

5.2.3 入学资格

申请考试焊工应具有初中或初中以上文化程度或同等学历，身体健康，能严格按照焊接工艺规程进行操作，独立承担焊接工作。

5.2.4 培训及考试内容

(1) 理论培训及考试

① 焊接安全知识和规定。

② 锅炉、压力容器和压力管道的基本知识。

③ 金属材料的分类、牌号、化学成分、力学性能、焊接特点和焊后热处理。

④ 焊接材料（焊条、焊丝、焊剂和气体等）类型、型



号、牌号、使用与保管。

⑤ 焊接设备、工具和测量仪表的种类、名称、使用和维护。

⑥ 常用焊接方法的特点、焊接工艺参数、焊接顺序、操作方法及其对焊接质量的影响。

⑦ 焊缝形式、接头形式、坡口形式、焊缝符号及图样识别。

⑧ 焊接接头的性能及其影响因素。

⑨ 焊接缺陷的产生原因、危害、预防方法和返修。

⑩ 焊缝外观检验方法和要求，无损检测方法特点、适用范围、级别、标志和缺陷识别。

⑪ 焊接应力和变形的产生原因和防止方法。

⑫ 焊接质量管理体系、规章制度、工艺文件、工艺纪律、焊接工艺评定、焊工考试和管理规则基本知识。

焊工基本知识考试满分为100分，不低于70分为合格。

(2) 技能培训及考试

1) 焊接操作技能考试应从焊接方法、试件材料、焊接材料及试件形式等方面进行考核。

焊接方法及代号见表8.3-21。

表 8.3-21　焊接方法及代号

焊接方法	代　号
焊条电弧焊	SMAW
气焊	OFW
钨极气体保护焊	GTAW
熔化极气体保护焊	GMAW（含药芯焊丝电弧焊 FCAW）
埋弧焊	SAW
电渣焊	ESW
摩擦焊	FRW
螺柱焊	SW

焊条类别、代号及适用范围见表8.3-22。

试件钢号分类及代号见表8.3-23。

表 8.3-22　焊条类别、代号及适用范围

焊条类别	焊条类别代号	相 应 型 号	适用焊件的焊条范围	相应标准
钛钙型	F1	EXX03	F1	GB/T 5117、GB/T 5118、GB/T 983（奥氏体双相钢焊条除外）
纤维素型	F2	EXX10，EXX11，EXX10－x，EXX11－x	F1，F2	
钛型、钛钙型	F3	EXXX（X）－16，EXXX（X）－17	F1，F3	
低氢型、碱型	F3J	EXX15，EXX16 EXX18，EXX48 EXX15－x，EXX16－x EXX18－x，EXX48－x EXXX（X）－15，EXXX（X）－16 EXXX（X）－17	F1，F3，F3J	
钛型、钛钙型	F4	EXXX（X）－16，EXXX（X）－17	F4	GB/T 983（奥氏体、双相钢焊条）
碱型	F4J	EXXX（X）－15，EXXX（X）－16，EXXX（X）－17	F4，F4J	

表 8.3-23　试件钢号分类及代号

类　别	代　号	典　型　钢　号　示　范				
碳素钢	Ⅰ	Q195 Q215 Q235	10 15 20 25 20R 20G 20G 22G	HP245 HP265	L175 L210	S205
低合金钢	Ⅱ	HP295 HP325 HP345 HP365	L245 L290 L320 L360 L415	12MnG 16Mn 16MnG 16MnR 15MnNbR	12CrMo 12CrMoG 15CrMo 15CrMoR 15CrMoG	09MnD 09MnNiD 09MnNiDR 16MnD 16MnDR



续表 8.3-23

类　别	代　号	典　型　钢　号　示　范			
低合金钢	Ⅱ	L450	15MnV	14Cr1Mo	15MnNiDR
		L485	15MnVR	14Cr1MoR	20MnMoD
		L555	20MnMo	12Cr1MoV	07MnNiCrMoVDR
		S240	10MnWVNb	12Cr1MoVG	08MnNiCrMoVD
		S290	13MnNiMoNbR	12Cr2Mo	10Ni3MoVD
		S315	20MnMoNb	12Cr2Mo1	
		S360	07MnCrMoVR	12Cr2Mo1R	
		S385		12Cr2MoG	
		S415		12Cr2MoWVTiB	
		S450		12Cr3MoVSiTiB	
		S480			
马氏体钢、铁素体不锈钢	Ⅲ	1Cr5Mo	0Cr13	1Cr17	1Cr9Mo1
奥氏体不锈钢、双相不锈钢	Ⅳ	0Cr19Ni9	0Cr18Ni12Mo2Ti	0Cr23Ni13	
		0Cr18Ni9Ti	00Cr17Ni14Mo2	0Cr25Ni20	
		0Cr18Ni11Ti	0Cr18Ni12Mo3Ti	00Cr18Ni5Mo3Si2	
		00Cr18Ni10	00Cr19Ni13Mo3	1Cr19Ni9	
		00Cr19Ni11	0Cr19Ni13Mo3	1Cr19Ni11Ti	
				1Cr23Ni18	

各种试件形式、位置及代号见表 8.3-24。

表 8.3-24　各种试件形式、位置及代号

试件形式	试件位置		代　号
板材对接焊缝试件	平焊		1G
	横焊		2G
	立焊		3G
	仰焊		4G
管材对接焊缝试件	水平转动		1G
	垂直固定		2G
	水平固定	向上焊	5G
		向下焊	5GX
	45°固定	向上焊	6G
		向下焊	6GX
管板角接头试件	水平转动		2FRG
	垂直固定平焊		2FG
	垂直固定仰焊		4FG
	水平固定		5FG
	45°固定		6FG
螺柱焊试件	平焊		1S
	横焊		2S
	仰焊		4S

焊接要素代号见表 8.3-25。

表 8.3-25　焊接要素代号

焊　接　要　素			要素代号
手工钨极气体保护焊填充金属焊丝		无	01
		实芯	02
		药芯	03
机械化焊	钨极气体保护焊自动稳压系统	有	04
		无	05
	自动跟踪系统	有	06
		无	07
	每面坡口内焊道	单道	08
		多道	09

2) 考试试件　各种试件形式如图 8.3-8 所示，主要包括：对接焊缝试件、管板角接头试件、螺柱焊试件和堆焊试件。

管板角接头试件接头形式见图 8.3-9。对接焊缝试件和管板角接头试件，分带衬垫和不带衬垫两种。

双面焊、部分焊透的对接焊缝和部分焊透的管板角接头均视为带衬垫。

(i) 平焊试件 代号1G　(ii) 横焊试件 代号2G　(iii) 立焊试件 代号3G　(iv) 仰焊试件 代号4G

(a) 板材对接焊缝试件（无坡口时为堆焊试件）

(i) 水平转动试件 代号1G（转动）　(ii) 垂直固定试件 代号2G　(iii) 水平固定试件 代号5G、5GX（向下焊）　(iv) 45°固定试件 代号6G、6GX（向下焊）

(b) 管材对接焊缝试件（无坡口时为堆焊试件）

(i) 水平转动试件 代号2FRG（转动）　(ii) 垂直固定平焊试件 代号2FG　(iii) 垂直固定仰焊试件 代号4FG　(iv) 水平固定试件 代号5FG　(v) 45°固定试件 代号6FG

(c) 管板角接头试件

(i) 平焊试件 代号1S　(ii) 横焊试件 代号2S　(iii) 仰焊试件 代号4S

(d) 螺柱焊试件

图 8.3-8 焊工考试试件形式

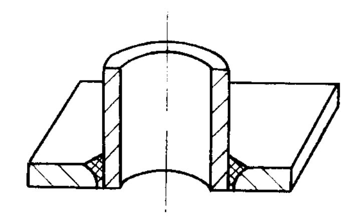


图 8.3-9 管板角接头试件接头形式

考试试件的尺寸和数量见表 8.3-26。其中堆焊试件首层至少堆焊三条并列焊道，总宽度≥38 mm；堆焊管材试件最小外径应满足取样数量要求。

试件适用范围见表 8.3-27～表 8.3-30。

3）试件的检验项目、检查数量和试样数量见表 8.3-31，每个试件需先进行外观检查，合格后再进行其他项目检验。

焊缝外形尺寸应符合表 8.3-32、表 8.3-33 和下列规定。

焊工焊接操作技能考试通过检验试件进行评定。各考试项目的试件按本章规定的检验项目进行检验，各项检验均合格时，该考试项目为合格。

试件的射线透照应按 JB 4730《压力容器无损检测》标准进行检测，射线透照质量不应低于 AB 级，焊缝缺陷等级不低于Ⅱ级为合格。

弯曲试验按本规则要求和 GB/T 232《金属材料弯曲试验方法》的规定进行。



表 8.3-26　试件的尺寸和数量　mm

试件类别	试件形式		试件尺寸						试件数量/个
			L_1	L_2	B	T	D	S_0	
对接焊缝试件	板	手工焊	≥300	—	≥200	任意厚度	—	—	1
		机械化焊	≥400	—	≥240				
	管	手工焊，机械化焊	≥200	—	—	任意厚度	<25	—	3
							25≤D<76	—	3
							≥76	—	1
		手工向下焊	≥200	—	—	任意厚度	≥300	—	1
管板角接头试件	管与板		—	手工焊≥75；机械化焊≥5	≥D+100	任意厚度	<76	≥T	2
							≥76		1
堆焊试件	板		≥250	—	≥150	任意厚度	—	—	1
	管		≥200	—	—				
螺柱焊试件	板与柱		(8~10)D	—	≥50	—	—	—	5

表 8.3-27　手工焊对接焊缝试件适用于对接焊缝焊件焊缝金属厚度范围　mm

焊缝形式	试件母材厚度 T	适用于焊件焊缝金属厚度	
		最小值	最大值
对接焊缝	<12	不限	$2t$
	≥12	不限	不限①

① t 不得小于 12 mm，且焊缝不得少于 3 层。

表 8.3-28　手工焊管材对接焊缝试件适用于对接焊缝焊件外径范围　mm

管材试件外径 D	适用于管材焊件外径范围	
	最小值	最大值
<25	D	不限
25≤D<76	25	不限
≥76	76	不限
≥300①	76	不限

① 管材向下焊试件。

表 8.3-29　手工焊管板角接头试件适用于管板角接头焊件范围　mm

管板角接头试件管外径 D	适用焊件范围				
	管外径		管壁厚度	焊件焊缝金属厚度	
	最小值	最大值		最小值	最大值
<25	D	不限	不限	不限	当 S_0 < 12 时，$2t$；当 S_0 ≥ 12 时①，不限
25≤D<76	25	不限	不限		
≥76	76	不限	不限		

① 当 S_0≥12 时，t 应不小于 12 mm，且焊缝不得少于 3 层。

表 8.3-30　试件适用焊件焊接位置

试件		适用焊件范围			
		对接焊缝位置		角焊缝位置	管板角接头焊件位置
形式	代号	板材和外径大于 600 mm 的管材	外径≤600 mm 的管材		
板材对接焊缝	1G	平	平②	平	—
	2G	平、横	平、横②	平、横	—
	3G	平、立①	平②	平、横、立	—
	4G	平、仰	平②	平、横、仰	—



续表 8.3-30

试件		适用焊件范围			
		对接焊缝位置		角焊缝位置	管板角接头焊件位置
形式	代号	板材和外径大于600 mm的管材	外径≤600 mm的管材		
管材对接焊缝	1G 2G 5G 5GX 6G 6GX	平 平、横 平、立、仰 平、立向下、仰 平、横、立、仰 平、立向下、横、仰	平 平、横 平、立、仰 平、立向下、仰 平、横、立、仰 平、立向下、横、仰	平 平、横 平、立、仰 平、立向下、仰 平、横、立、仰 平、立向下、横、仰	— — — — — —
管板角接头	2FG 2FRG 4FG 5FG 6FG	— — — — —	— — — — —	平、横 平、横 平、横、仰 平、横、立、仰 平、横、立、仰	2FG 2FRG、2FG 4FG、2FG 5FG、2FRG、2FG 所有位置

① 1. 表中"立"表示向上立焊；"立向下"表示向下立焊；
② 板材对接焊缝试件考试合格后，适用管材对接焊缝焊件时，管外径应≥76 mm。

表 8.3-31　试件的检验项目、检查数量和试样数量

试件类别	试件形式	试件厚度或管径/mm		检验项目						
		厚度	管外径	外观检查/件	射线透照/件	断口检验/件	弯曲试验/个			金相检验（宏观）/个
							面弯	背弯	侧弯①	
对接焊缝试件	板	<12	—	1	1	—	1	1	—	—
		≥12	—	1	1	—	—	—	2	—
	管②	—	<76	3	—	2	1	1	—	—
		—	≥76	1	1	—	1	1	—	—
	管材向下焊	<12	≥300	1	1	—	1	1	—	—
		≥12		1	1	—	—	—	2	—
管板角接头试件	管与板	—	<76	2	—	—	—	—	—	任一试件取3个检查面
			≥76	1	—	—	—	—	—	3
堆焊试件	板或管	—		1	1（渗透）	—	—	—	2	—
螺柱焊试件	板与柱	—		5	—	—	—	—	5（折弯）	—

① 当试件厚度≥10 mm时，可以用两个侧弯试样代替面弯与背弯试样。
② 管子摩擦焊按对接焊缝试件对待。

表 8.3-32　试件焊缝外形尺寸

mm

焊接方法	焊缝余高		焊缝余高差		焊缝宽度		焊道高度差	
	平焊	其他位置	平焊	其他位置	比坡口每侧增宽	宽度差	平焊	其他位置
手工焊	0~3	0~4	≤2	≤3	0.5~2.5	≤3	—	—
机械化焊①	0~3	0~3	≤2	≤2	2~4	≤2	—	—
堆焊	—	—	—	—	—	—	≤1.5	≤1.5

① 除电渣焊、摩擦焊、螺柱焊外，厚度不小于20 mm的埋弧焊试件，余高可为0~4 mm。



表 8.3-33　试件焊缝表面缺陷规定

缺陷名称	允许的最大尺寸
咬边	深度≤0.5 mm；焊缝两侧咬边总长度不得超过焊缝长度的 10%
背面凹坑	当 $T≤5$ mm 时，深度≤25% T，且≤1 mm；当 $T>5$ mm 时，深度≤20% T，且≤2 mm；除仰焊位置的板材试件不作规定外，总长度不超过焊缝长度的 10%

表 8.3-34　各类焊接技术人员

人员种类 / 培训人数 / 年份	国际焊接工程师（IWE）	国际焊接技师（IWS）	国际焊接技士（IWP）	国际焊工［ISO 9606（EN 287）］
2000 年	147	39	0	467
2001 年	378	36	133	621
2002 年	427	49	11	728
2003 年	281	86	0	515
总计	1233	210	144	2331

5.2.5　证书

焊工合格证（合格项目）有效期为 3 年，在合格项目有效期满前 3 个月，继续担任焊接工作的焊工，应向所属焊工考委会提出申请，由该考委会安排焊工考试或免考等事宜。

6　国际资质焊接人员培训在我国的开展情况及作用

6.1　国际资质焊接人员培训在我国的开展情况

2000 年 1 月在获得国际焊接学会正式授权后，机械工业哈尔滨焊接技术培训中心，在全国范围内推广此项工作，截至 2003 年 7 月先后在全国 20 余个省市，共举办各类培训班 30 余期，共培养包括国际焊接工程师在内的各类焊接技术人员 4 000 余名（见表 8.3-34）。

归纳起来有以下几个方面的特点。

1）国际焊接培训与资格认证是一项面向全国，服务于各个行业，各类企事业单位，各类不同层次的焊接人员的工作。三年来，先后有来自全国各地企、事业单位，大专院校等焊接界的同行，参加各类培训班的学习。如来自高校的有：哈尔滨工业大学、西安交通大学、西南交通大学、华南理工大学、西北工业大学、吉林大学、大连铁道学院、南京理工大学、太原理工大学等。来自国有企业的有：哈尔滨锅炉厂、宝山钢铁公司、三峡开发总公司、中国二重集团、东方锅炉厂、四方机车厂、株洲机车车辆厂、大庆油田、中建一局、中国第二十（二十二）冶建公司、上海沪东造船厂、上海江南造船厂、上海电建一公司、安徽电建一公司、齐鲁石化公司、中国石油天然气第一建设公司、西飞公司等。来自合资独资企业的有：上海振华港口机械公司、淄博西门子真空泵压缩机厂、韩国现代焊接材料株式会社代表处、林德－厦门叉车有限公司等等。来自研究机构及行业组织的有：哈尔滨焊接研究所、北京冶建研究总院、上海原子核研究所、上海焊接协会、国电热工研究院、成焊所、山东电力研究院等等。

来参加学习的人员无论从地理位置，还是行业领域都具有非常广泛的代表性。参加学习的人员目前来自除西藏、海南、云南、台湾以外，所有省、市、自治区，香港特别行政区人员也有来参加培训。另外，参加的学员除来自机械行业外，还有钢铁冶金、电力、交通、石油化工等行业。其中机械行业占全部学员的 23%。参加人员具有非常广泛的代表性，除了上面提到的参加人员来自不同的地区、不同的行业以外，学员中年龄最大的为 69 岁，很多厅局级干部参加学习，且自始至终，对这项培训工作给予了很大支持。经常会有企业总师带队参加培训，如：上海一著名钢结构有限公司，企业老总亲自带领 6 名技术人员参加学习。以上充分体现了面向全国，服务各行各业的宗旨。

2）这项工作采取了跨地区、跨行业的大联合、大合作的工作方式。三年中，各地方焊接学（协）会、各行业机构、大型企业及高校参与了这项工作，这样一方面各地区、各行业的人员可就近参加培训，同时，也在各地方及行业培养了了解国际标准及规程的技术骨干和师资队伍。具体体现在以下几方面。

① 三年中，先后有江苏省焊接学会、上海焊接协会、湖南焊接学会、湖南职工焊接技协、广东焊接学会、山西焊接学会、湖北暨武汉焊接学会、辽宁焊接学会、浙江焊接学会等地方学（协）会参与了这项工作。这样一方面发挥了各地方学（协）会在当地的影响，广泛宣传扩大招生并给学员提供了就近学习的机会，同时，也丰富了各地方学（协）会的活动。

② 其他行业机构合作的参与（如：冶建行业的中冶集团北京冶金建筑研究总院；电力行业的华北电力集团等单位），一方面扩大了国际焊接培训在各行业的影响；另一方面针对这些行业对外承揽国际工程，急需国际资质的焊接人员的要求，为这些行业培训了国际焊接工程师等人员，满足了参与国际竞争的需求。

③ 哈尔滨工业大学、上海交通大学、吉林大学、华南理工大学、华中科技大学、西南交通大学、西安交通大学、太原理工大学、大连铁道学院等高校的参与，一方面开展了在职人员的国际焊接工程师培训，另一方面，按照国际相关规程，以哈工大为代表开展了在校生国际焊接工程师的培训，为焊接专业毕业生提供了取得毕业证和学位证的同时，取得国际焊接工程师证书的机会。

④ 株洲电力机车厂与德国西门子公司合作，生产地铁车辆，德方对该厂的焊接人员和企业的资格提出了要求，为此专门为该厂在企业内部举办了国际焊接工程师及国际焊工培训及资格认证，解决了该厂焊接人员取得国际资质的问题。



6.2 国际培训及资格认证工作作用

国际培训与资格认证工作能够提高焊接技术人员及工人的素质和水平，增强企业参与国际竞争的能力，取得了巨大的社会效益和经济效益，具体体现在以下几个方面。

① 提高了我国焊接界全行业从业人员的水平，特别是培养了一批了解和熟悉并掌握国际标准及规程的技术骨干，培训工作取得很好的效果，得到了焊接界的肯定，并受到各类焊接人员的欢迎。

② 增强了企业参与国际竞争的能力，给企业带来了巨大的经济效益。

③ 为在高校学生中培养具有国际资质的焊接毕业生开辟了一条新路。目前，我国绝大多数高校取消焊接专业，焊接人员的培养必将按照国际惯例走向大学基础教育与就业前培训相结合的道路。

④ 为推动我国的职称改革工作做了积极的尝试。随着全球经济一体化进程的加快，人员资质必将走向以考代评的道路。因此，焊接人员的资质国际化就和国内目前注册律师、会计师等人员资质一样必将会作为国际统一的资质在我国广泛采用，并成为我国焊接人员走向世界，与国际接轨的通行证。

编写：钱强（机械工业哈尔滨焊接技术培训中心）
陈宇（机械工业哈尔滨焊接技术培训中心）



中 国 材 料 工 程 大 典
CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON
第 23 卷 材料焊接工程(下)

第 9 篇

焊接结构服役与再制造

主 编 史耀武

编 写 霍立兴 张 莉 邓彩艳
潘希德 薛 锦 朱 胜
徐滨士 姚巨坤

审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET



第1章　焊接结构的断裂及安全评定

1　断裂分类及术语

在讨论结构失效特性之前，应当对描述断裂的术语加以说明、解释和分类。因为乱用像解理、晶粒状、剪切、纤维状等术语，已经造成了对断裂问题理解的混乱，以致于分析同一断裂事件，经常被不同观察者用完全不同的术语加以描述。更有甚者，同一观察者也用不同的术语阐述一种断裂特性，使人费解。例如：常常把脆断、解理、晶粒状断口、低应力破坏等同起来不加区分地使用，就是一个典型的例证。因此为了更好地理解焊接结构的脆性和延性失效，有必要对有关术语加以简单论述。

1.1　断裂性质

经常以脆断和延断来说明断裂性质，它们反映材料或结构断裂前的行为，即延性断裂表明在断裂之前，金属或结构要发生显著的塑性变形；相反，脆性断裂则表明金属材料或结构在断裂前发生很少的塑性变形。

当然，这只是人为的定性概念。在定量上，如金属结构发生多大程度的塑性变形属于延性断裂，小于何种程度的塑性变形量属于脆断，仍需依具体情况而定。它往往与采用的评定标准和测量塑性变形的工具类型、精度有关，也和所评定的金属或结构的特性有关。例如对于铁轨用钢，当试样断裂时伴有百分之几的塑性变形时，属延性断裂；但对于低碳钢来说，其断裂性质无疑属于脆性断裂。

1.2　断裂机制

(1) 解理断裂

剪切和解理均为表示金属及其结构断裂机制的术语。

在晶体材料中，如在某些金属中，可沿着一定的结晶平面如｛100｝平面发生解理断裂，一些金属的解理平面示于表9.1-1中。

表9.1-1　各种材料的滑移面和解理面

晶体结构	金属和合金名称	解理面	主要滑移面
体心立方	Li，Na，K，α－Fe大多数钢，V，Cr，Mn，Nb，Mo，W，Ta，Ti－β	100	112，110
面心立方	Cu，Ag，Au，Al，Ni，黄铜，奥氏体不锈钢	无	111
密排六方	Be，Mg，Zn，Sn，Ti－α，Cd，U	0001	1010，0001

解理断裂多见于体心立方，密排六方金属中，这是因为金属材料在一定条件下，例如低温、高应变速率及高应力集中情况下，材料的塑性变形严重受阻，材料不能以形变方式而是以分离来顺应外加应力，从而发生解理裂纹。金属中的夹杂物、脆性析出物和其他缺陷对解理裂纹的产生亦有重要影响。

应当说明，有时也可沿滑移面或孪晶面解理分离。在特殊情况下，面心立方金属如铝等也能解理断裂。但在一般情况下，面心立方晶体很少发生解理断裂。

典型的解理断口电子金相照片具有的重要特征为河流状花样。它是解理台阶和局部塑性变形形成的撕裂脊线所组成的条纹。河流的流向恰好与裂纹扩展方向一致，所以，人们可根据河流花样的流向，判断解理裂纹在微观区域内的扩展方向。另外，解理微观断口也经常出现舌状花样、扇形花样、鱼骨状花样等。

(2) 剪切断裂

这是在切应力作用下，沿滑移面滑移形成的断裂，它分为两种类型。

1) 纯剪切或滑断　金属在外力作用下，沿最大切应力的滑移面（一般与拉应力轴线成45°角）滑移。最后因滑移面滑动分离而断裂。这种断裂多发生于纯单晶金属中。

2) 微孔聚集断裂　在外力作用下，因晶粒强烈滑移，位错堆积，造成在某些局部部位产生许多显微空洞，（或因夹杂物破碎形成微小空洞），这种空洞在切应力作用下不断长大、聚集（有时还伴有新的微小空洞产生），最终导致整体材料或结构的断裂。这类剪切断裂，多发生于钢铁工程材料中。

对于纯剪切断裂，其微观断口为"蛇形滑动"、"涟波"花样，或为没有什么特殊形貌的平坦区，称为平直区。对于微孔聚集断裂，其微观特征为韧窝——它表示发生了强烈的剪切变形。

1.3　断口形貌

常用的术语有纤维状、丝状、晶粒状等。应当说明这些术语与断裂机制，或与断裂前材料的塑性变形程度没有直接联系。这是因为宏观断口虽可为纤维状形貌，但是不能排除其中的一些晶粒是由于解理而破坏的，即是沿一定的晶面破坏的；反之，一些宏观上属于晶粒状的断裂形貌，也完全可以有一些晶粒是剪切机制造成的断裂。

由于受力状态、材质和介质的特点，实际金属材料的断裂比较复杂，常常不是单一的机制，如纯延性断裂或纯解理断裂等，而是具有多种机制的混合断裂，即两种或两种以上断裂机制相继发生的结果。焊接宽板拉断的断口常常可以在预制裂纹根部看到对应剪切机制的延性断裂的纤维状形貌，随后为快速扩展的放射状线条区－人字纹区，断口两侧及端部有剪切唇。随着条件的变化，如温度降低，材料塑性变差、缺口尖锐度等，则剪切唇和纤维状区可能减少，甚至消失。人字纹也可能变得不明显，整个断面呈闪光的结晶状断口，出现几乎完全的脆性断裂。反之则剪切唇可以增大，直到形成跨越整个断面的45°斜断口，呈现典型的纤维状延性断裂。这说明纤维状、晶粒状虽与断裂机制、断裂性质无直接联系，但是根据纤维区、晶粒状区（或放射区）的相对比例，仍可大致估计断裂的性质。

综上所述，正确应用描述断裂的术语，对合理分析研究焊接结构断裂失效有重要的意义，但是这些术语也不是完全可以分割的。就焊接结构脆性破坏而言，它具有如下的特点。

1) 断口平面　一般垂直于板材厚度表面，靠近断口处的油漆和锈皮不裂也不脱落，这说明在厚度方向上收缩很少，构件整体变形不大。

2) 断口　断口发亮有小刻面和呈晶粒状，或呈放射状－人字纹条纹。人字纹指向裂源，其反向为裂纹的扩展方向。

3) 剪切唇　在许多脆性断裂的构件中，在靠近板材表面处出现很窄的剪切唇，它是造成板材在厚度方向上变薄的

主要原因。

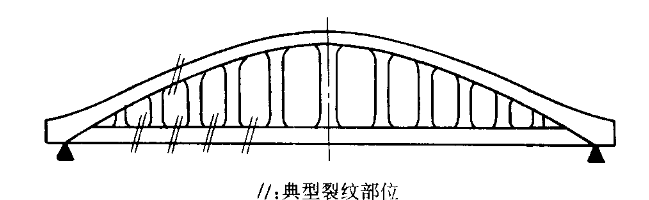
4）应力　脆性破坏时所承受的工作应力一般较低，通常不超过材料的屈服点。

5）温度　中、低强度钢的脆断事故，一般发生在较低的温度。

2　焊接结构的工作特点及防断设计

2.1　典型的脆性事故举例

1938年3月比利时 Albrert 运河上一座全焊接 Vierendeel 式、跨度74.52m的 Hasselt 桥的脆断事故是一起典型的例子，桥梁简图如图9.1-1所示。第二次世界大战前在该运河上先后建造了50余座该式桥梁，长度随河宽而定。该 Hasselt 桥梁在工作一年以后，突然伴随着剧响在第三、第四主柱之间的下弦杆处产生一巨大裂缝，造成上弦杆形成拱状结构，数分钟后桥梁断为三截，并落于运河中。当时桥上载荷并不大，事故发生时气温为 - 20℃。在1940年1月19日和25日，该运河上另外两座桥梁又发生局部脆断事故。总计从1938～1940年间，此50余座桥梁中，共有十多座发生了脆断事故。由于大战原因，调查这些事故的委员会并没有及时公开发表文章的调查报告，只是在一些国家中部分地发表了有关这个问题的研究情况。



地点（桥名）	类　型	中间跨度/m	宽　度/m	下弦杆	日　期	
					建成年份	失　效
Hasselt	轻轨铁路和道路	74.2（mm）	14.3	日	1935/1936	1938年3月
Herenth alsoolen	轻轨铁路和道路	60 m	9.4	工	1936/1937	1940年1月
Kaulille	道路	48	8.7	工	1934/1935	1940年1月

图9.1-1　Hasselt 桥梁简图

1951年加拿大的一座焊接桥梁也发生了脆性断裂悲惨事故，它是一座公路桥（图9.1-2），跨度为（74 + 6 × 54 + 47）m。当一辆汽车在 - 35℃通过该桥梁时，桥梁断塌了。在1950年2月，也就是在交付使用后的二年多一点的时间，在一个很冷的夜晚在支座附近的X处的梁的腹板和上弦杆处发生了裂纹，这些裂纹被及时用铆接方法修理好了，但1951年，桥又发生了断裂，共有四个跨度塌陷。根据残骸的位置可以判断，首先是在第二孔即曾修好的断裂处又发生了裂纹，随后在第四孔产生了新的断裂而形成了脆断事故。

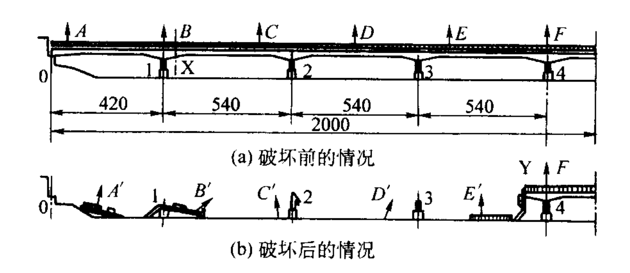


图9.1-2　加拿大三河桥的破坏情况

X—1950年破坏后用铆钉修补处；Y—1951年新破坏的地方

1946年，美国海军部发表资料表明，在第二次世界大战期间，美国制造的4694艘船只中，发现在970艘船上1 442处裂纹，这些裂纹多出现在万吨级的自由轮上，其中24艘甲板全部横断，1艘船底发生完全断裂，8艘从中腰断裂为两半，其中4艘沉没，上述事故有的是发生在风平浪静的情况之下。

圆筒形储罐和球形储罐的破坏事故更为严重。一起事故发生在1944年10月20日美国东部的俄亥俄煤气公司液化天然气储存基地，该基地装有3台内径为17.4 m的球形储罐，1台直径为21.3 m、高12.8 m的圆筒形储罐。事故是由圆筒形储罐开始的。首先在其1/3～1/2高度的断裂处喷出气体和液体，接着听见雷鸣般的响声，化为火焰，然后储罐爆炸，酿成大火。20 min后，一台球罐因底脚过热而倒塌爆炸，使火情进一步扩大，这次事故造成128人死亡。损失金额达868万美元。

随着焊接技术的发展，特别是材料科学的发展，焊接结构发生脆性破坏事故日益减少，但并未杜绝。20世纪70年代以来仍发生过桥梁、压力容器、采油平台、球形容器等一些结构的脆性破坏事故。例如澳大利亚墨尔本的金斯（King's）桥在盖板横焊缝（见图9.1-3）焊接时的氢致裂纹在疲劳载荷的作用下，引发该裂纹扩展，最后在工作应力和盖板纵向焊缝的残余应力共同作用下，在 - 4℃左右的气温下（证明材料的冲击韧度不够）导致工作主梁的脆性破坏事故。

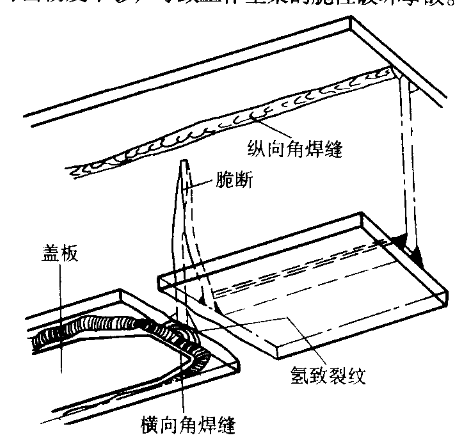


图9.1-3　墨尔本的金斯桥的断裂情况

更应该指出的是，20 世纪 90 年代即 1995 年 1 月 17 日在日本的阪神大地震中，一些按当今日本有关标准设计的钢结构的梁－柱焊接接头发生了一系列脆性断裂，图 9.1-4 示出了该种梁柱接头的典型断裂特点。它们多起源于垫板。而恰在一年前此日，即 1994 年 1 月 17 日在美国洛杉矶地区发生的里氏 6.8 级地震中，亦造成了大量的梁－柱接头的脆断事故。与阪神地震结构损失不同，洛杉矶 Northridge 地区的梁－柱接头在脆断前几乎未发生任何塑性变形，日本和美国的梁柱接头品质具有一定的区别，但无例外均出现了上述脆断事故。

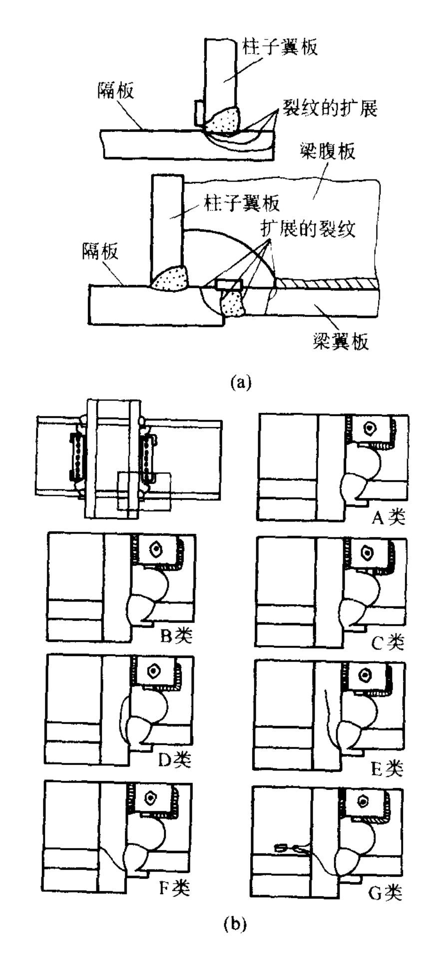


图 9.1-4　梁—柱接头的断裂情况

2.2　断裂机理及设计准则

2.2.1　脆性和延性裂纹的产生和扩展

结构中不论是延性断裂还是脆性断裂，均由两个步骤组成，即首先在缺陷尖端或应力集中处产生裂纹，然后该裂纹以一定形式扩展，最后造成结构失效破坏。中低强度钢材的裂纹产生和扩展情况示于图 9.1-5 中。

对于承受静载的结构，裂纹产生与温度的关系如图 9.1-5 曲线 1 所示。曲线 2 反映了裂纹扩展与温度的关系，它可由动载试验测出。

在曲线的第一区，由于温度很低，在缺陷尖端，裂纹将以解理机制产生。在曲线的第二区由于温度升高，裂纹产生所需能量提高，即裂纹为解理和剪切混合机制。曲线第三区为纯剪切机制的裂纹。

但如分析裂纹扩展特性则会发现，在图中温度 *A* 处施载启裂后，裂纹将以吸收能量低的解理机制扩展；而在温度 *B* 处施载，启裂前要发生一定塑性变形，因而要消耗一定的

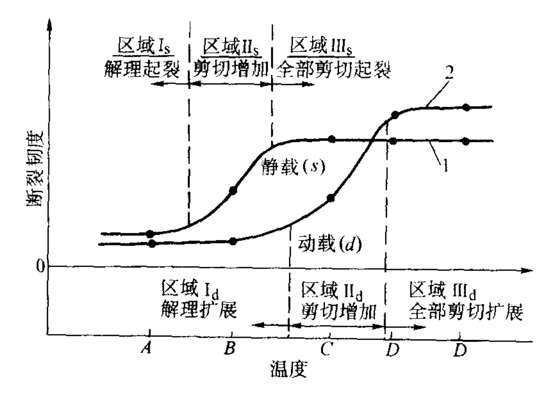


图 9.1-5　裂纹产生与扩展之间的关系

断裂功。如果此时材料是对加载速度敏感的材料——该种材料广泛应用于焊接结构，如桥梁、石油平台、船舶中，则启裂后仍以消耗能量少的解理裂纹扩展。其微观断口以对应解理机制的形貌为主（如河流花样、扇状花样等）。如果在温度 *C* 时加载，则启裂为消耗变形功较高的剪切机制启裂，此时裂纹扩展虽然具有一定剪切面积，仍以对应解理机制的断口为主。最后如果对结构在高于温度 *D* 的情况下施载，则不论是启裂，还是裂纹扩展，均以剪切机制发生。

上述图形所阐述的原则，可应用于由一种材料构成的试样或构件。事实上焊接结构或焊接接头是由力学和冶金性能非均质材料构成，而且还在焊接残余应力直接作用之下。研究表明，在这样条件下，除非焊缝中具有严重缺陷；或材料强度很高、或材料经过热处理，使得焊接残余应力作用相对减弱外，一般裂纹在焊缝内启裂，然后偏入母材并在其中扩展。显然此时考虑焊缝、或热影响区的启裂性能是主要的，而对母材则需考虑其止裂性能，这是焊接结构防断设计的基本内容。

2.2.2　防断设计准则

焊接结构的脆性破坏由两个步骤组成，即在焊接结构缺陷处，如焊接冷、热裂纹、安装施工裂纹、咬肉、未焊透、腐蚀、疲劳裂纹等缺陷处首先产生一脆性裂纹，然后该裂纹以极快速度扩展，部分地或全部地贯穿结构，使结构发生破坏。

为防止焊接结构发生脆性破坏，相应地有两个设计准则：一为防止裂纹产生准则（即“开裂控制”），二为止裂性能准则（即“扩展控制”）。前者要求结构的薄弱部位应具有一定的抗开裂性能，后者则要求一旦裂纹产生，材料应具有将其止住的能力。显然，后者比前者要求苛刻些。

国际焊接学会 2912 小组经过大量研究工作于 20 世纪 70 年代提出，防止焊接结构脆性破坏事故有效而又经济的方法，是要求在焊接结构最薄弱的地方，即焊接接头处应具有一定的抵抗脆性裂纹产生的能力，即抗开裂能力；同时希望，如果在这些地方产生了脆性小裂纹，其周围的基体金属应具有将其迅速止住的能力，即对小裂纹的止裂能力。显然其设计的着眼点主要是放在防止裂纹产生（即开裂控制）上，而基本金属的止裂性能只作为参考。这是因为，研究表明对于中低强度钢来说，由于残余应力的作用，除非在焊缝中具有大量未焊透等焊接缺陷或沿焊缝方向的工作应力很高以外，脆性裂纹一般向基体金属扩展。因此基体金属具有一定的止裂性能，对防止焊接结构脆性断裂还是有利的。

相应于上述设计要求，可以通过有关试验测出材料的抗开裂性能和止裂性能，供设计者采用。这些试验方法可分为开裂型试验和止裂型试验。

提供抗开裂性能的开裂型试验，是用以确定结构缺陷处产生裂纹的条件。例如下文将要介绍的 CTOD 试验，它要确



定的指标是试样断裂前试样上疲劳裂纹的张开值，换言之，这种试验反映裂纹产生前韧性参量指标，因此可归属于开裂型试验。反之，凡是反映脆性裂纹产生后扩展指标的试验皆为止裂型试验，例如下文介绍的 Robertson 试验，动态撕裂试验等就是如此。

2.3　与防断设计准则相关的试验方法

2.3.1　抗开裂性能试验方法

断裂力学方法是目前广泛应用的抗开裂性能试验方法，目前已有大量的有关断裂力学理论计算、测试及应用的书籍和资料供读者参阅，本书只着重介绍断裂参量的测试。

随着断裂力学学科的发展及应用，不少国家均制定颁布了断裂力学参量 K_{IC}，COD（δ）和 J_{IC} 的测试标准，我国也于20世纪80年代先后颁布了上述断裂力学参量测试的国家标准。如 GB 4164—81“金属材料平面应变断裂韧性 K_{IC} 试验方法”，GB 2358—80“裂纹张开位移（COD）试验方法”，GB 2038—80“利用 J_R 阻力曲线法确定金属材料延性断裂韧度的试验方法”等。国际上，不久前英国焊接研究所又提出了一个测试上述三个参量统一标准草案 BS 7448，受到了国际焊接学会的重视，并予以推广应用。该标准共分为四个部分，其中与脆断相关的三部分为：“测定金属材料 K_{IC}、极限 COD 值和极限 J 积分值方法”PartⅠ、“测定金属材料焊缝 K_{IC}、极限 COD 值和极限 J 积分值方法”PartⅡ 以及“测定金属材料裂纹稳定扩展的断裂阻力曲线以及启裂值的方法”PartⅣ，可以说这是一部国际上通用的材料及焊缝的断裂力学参量测定标准，已经在实际工程中得到应用，本书在此对上述标准作简要介绍。

金属材料测试标准中的测试流程如图 9.1-6 所示。

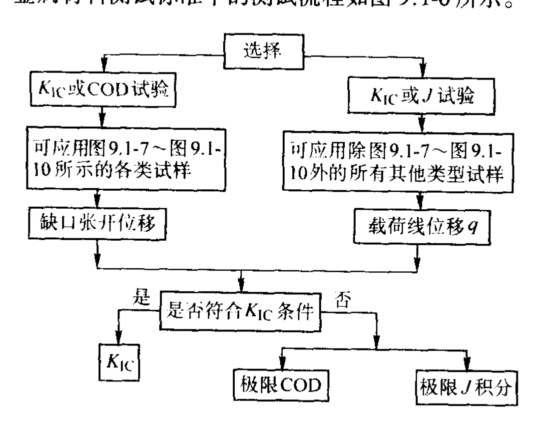


图 9.1-6　金属材料测试标准流程图

（1）试样

1）试样类型　可分为四种类型：长方形三点弯曲试样（图 9.1-7）；方形三点弯曲试样（图 9.1-8）；直缺口紧凑拉伸试样（图 9.1-9）；阶梯缺口紧凑拉伸试样（图 9.1-10）。

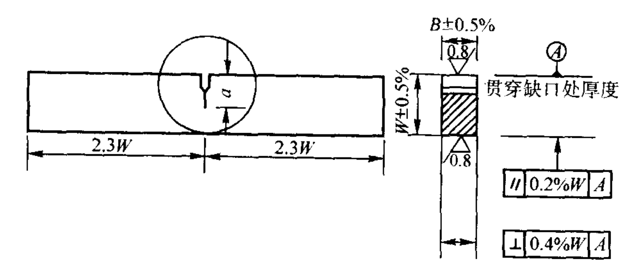


图 9.1-7　长方形截面弯曲试样

W—试样宽度；B—试样厚度，$B=0.55W$

a—裂纹长度，$a=(0.45\sim0.55)W$

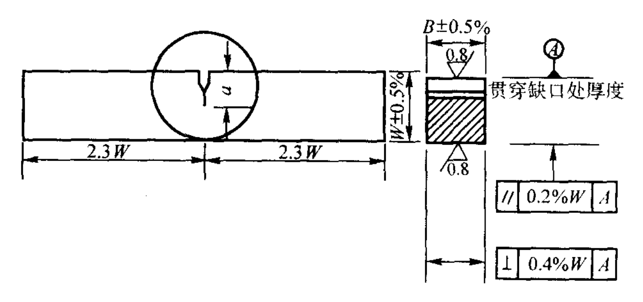


图 9.1-8　方形截面弯曲试样

W—试样宽度；B—试样厚度；a—裂纹长度，$a=(0.45\sim0.55)W$

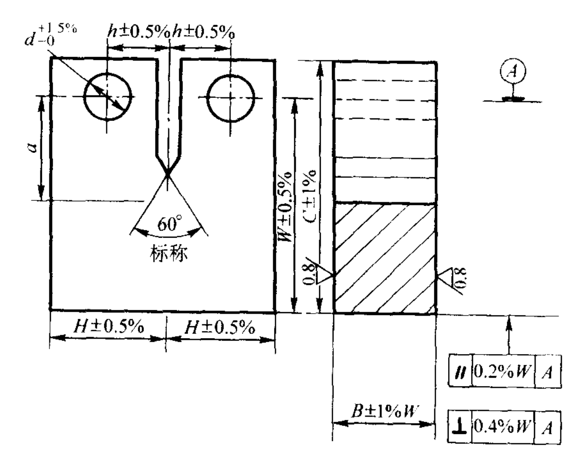


图 9.1-9　直缺口紧凑拉伸试样

W—有效宽度　C—试样宽度，$C=1.25W$　B—试样厚度（$B=0.5W$）

H—半高度（$H=0.6W$）　d—孔径（$d=0.25W$）

h—两孔间的一半距离（$h=0.275W$）

a—裂纹长度，$a=(0.45\sim0.55)W$

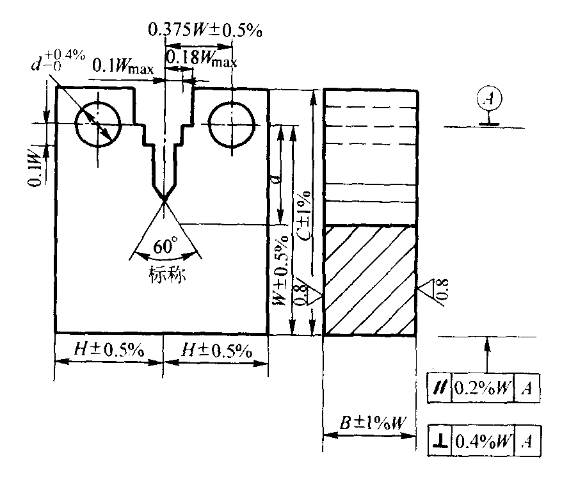


图 9.1-10　阶梯缺口紧凑拉伸试样

W—有效宽度；C—试样宽度，$C=1.25W$；

B—试样厚度，$B=0.5W$；H—半高度，$H=0.6W$；

d—孔径，$d=0.25W$；a—裂纹长度，$a=(0.45\sim0.55)W$

2）除非下述几种情况以外应当采用原厚度试样

① 除非试样形式、材料和温度的特殊组合表明断裂韧度与厚度无关（例如已证明所采用的试样厚度可获得真正的 K_{IC} 值）。

② 已建立了试样厚度和待试的亚尺寸厚度之间的关系。

③ 产品无确定的厚度值，此时应采用尽可能厚的试样。

3）试样尺寸加工要求

① 裂纹长度最小应为 0.45 倍的试样宽度，即 $a/W\geq0.45$。



② 在机械缺口上预制的疲劳裂纹长度应不小于 1.3 mm 或 12.5%试样宽度的二者最小值。

③ 裂纹两表面长度差不大于该二表面裂纹均值的 15%。

④ 预制的疲劳裂纹平面与裂纹扩展的平面夹角应不大于 10°。

⑤ 进行 K_{IC}试验的试样，由于真正的 K_{IC}值将依赖于载荷 - 位移曲线的形状，试样尺寸和形状，屈服应力和相关温度下的韧性值，因此对试样尺寸提出一定要求，即裂纹长度、试样厚度和韧带尺寸均不小于 $2.5\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{js}}\right)^2$。

4）预制疲劳裂纹的规定　要求在室温下进行，且最大预制疲劳裂纹载荷 F_f 应是下述三种情况最低者。

① 三点弯曲试样

$$\left.\begin{aligned} F_f &= \frac{B\ (W-a)^2\ (\sigma_{ysp}+\sigma_{Tsp})}{\Delta s} \\ \text{对应于}\frac{\Delta K}{E} &= 3.2\times10^{-4}m^{0.5}\text{的载荷 } F_f; \\ F_f &= \frac{K_f BW^{1.5}}{S\times f\left(\frac{a}{W}\right)} \end{aligned}\right\} \quad (9.1\text{-}1)$$

式中，$K_f=0.6\left(\frac{\sigma_{ysp}}{\sigma_{ys}}\right)K_Q$；$\sigma_{ysp}$为应于 0.2%应变的应力；$\sigma_{ys}$为断裂试验温度下的 0.2%应变时的应力。

② 紧凑拉伸试样

$$\left.\begin{aligned} F_f &= \frac{0.28\ (W-a)^2\ (\sigma_{ysp}+\sigma_{Tsp})}{(2W+a)} \\ \text{对应于}\frac{\Delta K}{E} &= 3.2\times10^{-4}m^{0.5}\text{的载荷 } F_f; \\ F_f &= \frac{K_f BW^{0.5}}{f'\left(\frac{a}{W}\right)} \end{aligned}\right\} \quad (9.1\text{-}2)$$

上述公式中的$f(a_0/W)$和$f'(a_0/W)$可用公式（9.1-5）和式（9.1-7）推导，或查表 9.1-2、表 9.1-3 得到。

（2）试验程序

1）试验前应校核试样厚度 B、韧带尺寸（$W-a$），对于紧凑拉伸试样还有 $c-W$（见图 9.1-9，图 9.1-10），试验后应校核裂纹尺寸，精度为 ±0.025 mm 或 ±0.1%。

2）按要求装卡好试样后，试验时应保证距裂纹尖端 2 mm 处为试验温度，精度 ±2℃，保温时间为不少于 30 s/mm。

3）加载速度 $\dot{K}$，在线弹性变形时应保证在 0.5 ~ 3.0 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}\cdot\text{s}^{-1}$之间。

4）对于 K_{IC}和 COD 试验，记录载荷 - 缺口张开位移即 $P-V$ 曲线，对于 J 积分试验记录 $P-Q$（载荷线 - 位移曲线）。试验时保持 $P-V$ 和 $P-Q$ 曲线初始斜率在 0.85 ~ 1.5 之间，开始时斜率常出现非线性情况，可用低于 F_f 的载荷反复加载几次，则可以减少这种非线性误差，试验至载荷不再上升或断裂时停止。

5）试验后，应测定裂纹初始长度 a_0 和裂纹扩展量 Δa。

精度应保证 ±0.25%和 ±0.05 mm 两值最大者。测量方法为将裂纹沿厚度方向分成八等分，注意 1 和 9 点为各距表面 0.01B 处的点，首先将此二点长度值平均，再将该均值与其他七点裂纹长度测量值平均。

原始裂纹长度 a_0 应满足下述要求。

① a_0/W 比值应在 0.45 ~ 0.55 范围内。

② 九点裂纹长度测量值中的任意两条长度误差不超过 10%a_0。该平均裂纹长度 a_0 值将用来计算 K_{IC}，COD 或 J 积分值。

③ 任一条所测裂纹长度中的疲劳裂纹长度均不小于 1.3 mm 或 2.5% W。

④ 疲劳裂纹平面与裂纹扩展面的夹角应不大于 10°。

⑤ 对于裂纹扩展量的 Δa 的测量方法同上，它是试样达到最大载荷平台前的裂纹扩展量或 Pop - in（突跃）前的裂纹扩展量，测量后应予以画图记录。

（3）试验数据分析

载荷 - 位移曲线一般有 6 种形式，如图 9.1-11 所示。其中曲线（1）、（2）、（3）表明载荷 - 位移曲线近似线性关系，因而可能得到真正的 K_{IC}值，而曲线（4）、（5）、（6）一般与弹塑性断裂有关，因而适用于测定 COD 值或 J 积分值。应当说明：对于阶梯缺口紧凑拉伸试样，裂纹张开位移和载荷线位移是一致的。因而可用它测试 K_{IC}、COD 和 J 积分，而对于三点弯曲试样，二者是不一致的，因而要分别测试。

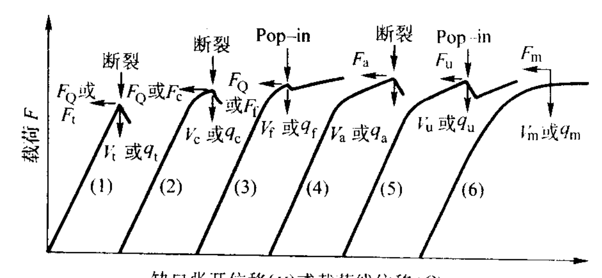


图 9.1-11　断裂力学试验的 $P-V$ 或 $P-Q$ 试验曲线

根据 Pop - in 定义，当载荷下降（y）和位移（x）增加均不足 1%时，该 Pop - in 忽略不计（图 9.1-12），其他情况则应予以考虑，并按下式进行评定。

$$d_n\%F_1 = 100\left[1-\frac{D_1}{F_1}\left(\frac{F_n-Y_n}{D_n+x_n}\right)\right]\% \quad (9.1\text{-}3)$$

式中符号的意义见图 9.1-12，下标 n 表示待评的某一个 Pop - in。

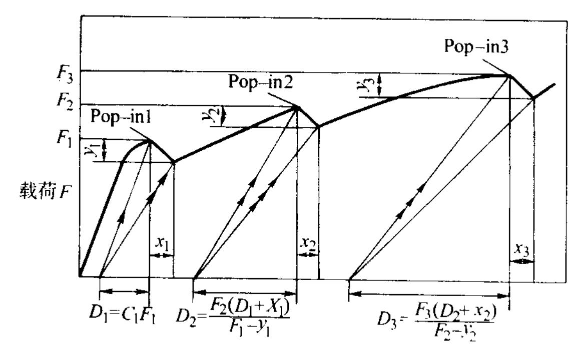


图 9.1-12　Pop - in 现象的评定

C_1 为原始柔度；D 代表 V 或 q

1）平面应变断裂韧性 K_{IC}的测定　根据图 9.1-13 所示 $P-V$ 或 $P-Q$ 曲线经过圆点引 OF_d 线段，对于三点弯曲试验，该 OF_d 线斜率比记录的 $P-V$ 曲线 OA 低 5%（$d_n\%$ $F=5\%$），或比记录的三点弯曲 $P-Q$ 曲线 OA 低 4%，而对于紧凑拉伸试验无论是 $P-V$ 曲线还是 $P-Q$ 曲线均低 5%。

此后如果在 F_d 以前，记录曲线上每一点的载荷都低于 F_d 图 9.1-13（Ⅰ），则取 $F_d=F_Q$，如果在 F_d 以前，有一最大载荷超过 F_d，则应取这个最大载荷为 F_Q，如图 9.1-13（Ⅱ）、（Ⅲ）曲线所示。

再根据 F_{max}/F_Q 的比值，如该比值大于 1.1，则这意味着不会得出真正的 K_{IC}值，如该比值低于 1.1，再由该 F_Q 值计算 K_Q 值。

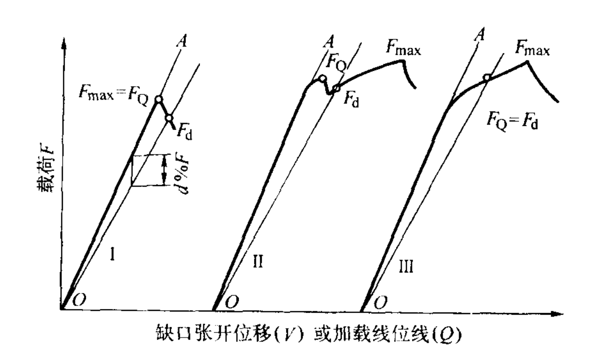


图 9.1-13　测定 K_Q 时 F_Q 的测定

对于三点弯曲试验：

$$K_Q=\frac{F_Q S}{BW^{1.5}}f(a/W) \tag{9.1-4}$$

式中

$$f(a_0/W)=\frac{3\left(\frac{a_0}{W}\right)^{0.5}\left[1.99-\left(\frac{a_0}{W}\right)\left(1-\frac{a_0}{W}\right)\left(2.15-\frac{3.93a_0}{W}+\frac{2.7a_0^2}{W}\right)\right]}{2\left(1+\frac{2a_0}{W}\right)\left(1-\frac{a_0}{W}\right)^{1.5}} \tag{9.1-5}$$

或由表 9.1-2 查出。

表 9.1-2　用于三点弯曲试样的$f(a_0/W)$值

a_0/W	$f(a_0/W)$	a_0/W	$f(a_0/W)$
0.450	2.29	0.505	2.70
0.455	2.32	0.510	2.75
0.460	2.35	0.515	2.79
0.465	2.39	0.520	2.84
0.470	2.43	0.525	2.89
0.475	2.46	0.530	2.94
0.480	2.49	0.535	2.99
0.485	2.54	0.540	3.04
0.490	2.58	0.545	3.09
0.495	2.62	0.550	3.14
0.500	2.66		

对于紧凑拉伸试样

$$K_Q=\frac{F_Q}{BW^{0.5}}f'\left(\frac{a_0}{W}\right) \tag{9.1-6}$$

式中

$$f'\left(\frac{a_0}{W}\right)=\frac{\left(2+\frac{a_0}{W}\right)\left(0.886+4.64\frac{a_0}{W}-13.32\frac{a_0^2}{W^2}+14.72\frac{a_0^3}{W^3}-5.6\frac{a_0^4}{W^4}\right)}{\left(1-\frac{a_0}{W}\right)^{1.5}} \tag{9.1-7}$$

或由表 9.1-3 查出。

表 9.1-3　用于紧凑拉伸试样的$f'(a_0/W)$

a_0/W	$f'(a_0/W)$	a_0/W	$f'(a_0/W)$
0.450	8.34	0.500	9.66
0.455	8.46	0.505	9.81
0.460	8.58	0.510	9.96
0.465	8.70	0.515	10.12
0.470	8.83	0.520	10.29
0.475	8.96	0.525	10.45
0.480	9.09	0.530	10.63
0.485	9.23	0.535	10.80
0.490	9.37	0.540	10.98
0.495	9.51	0.550	11.36

最后计算 K_{IC}，如果 $2.5\left(\frac{K_Q}{\sigma_{ys}}\right)^2$ 小于裂纹长度、厚度 B 和韧带尺寸 $W-a_0$，则 $K_Q=K_{IC}$。相反，如 $2.5\left(\frac{K_Q}{\sigma_{ys}}\right)^2$ 大于上述三个尺寸参数，则无真正 K_{IC} 值。而只能提供 K_Q 值，或再用弹塑性断裂力学方法测定计算 COD 和 J_{IC} 极限值。

2）极限 COD 值测定

① 首先根据图 9.1-11（1）～（5）所示曲线，测定对应下述记录点的 F_c 和 V_c 或 F_u 和 V_u，或 F_m 和 V_m 以及裂纹扩展量 Δa。

a. 没有明显 Pop－in 效应的断裂点如图 9.1-11 中的（1）、（2）、（4）曲线。

b. 断裂前或首次达到最大载荷平台以前的载荷下降值 $d_n\%F_1$ 达到或超过 5%的点。

c. 所有 Pop－in 的 $d_n\%F_1$ 均未超出 5%的断裂点。

d. 参见图 9.1-11（6），如果在达到最大载荷平台前未发生断裂或所有的 Pop－in 的 $d_n\%F_1$ 值均小于 5%时，应测定对应最大载荷点的 F_m 和 V_m。

② 由记录的 V_c、V_u 或 V_m 计算裂纹张开位移塑性部分 V_p 值。可采用作图法（见图 9.1-14）。或者从整体裂纹张开位移量扣除弹性部分的分析法。

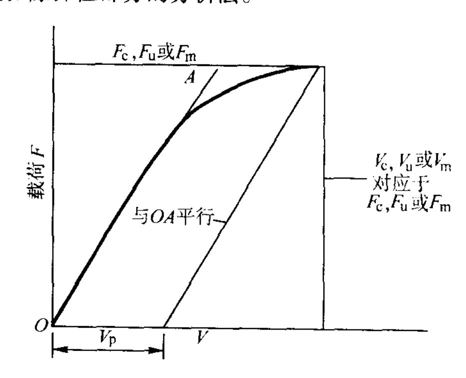


图 9.1-14　COD 试验中 V_p 的测定

③ COD 值的计算

a）对于三点弯曲试样：

$$\delta=\left[\frac{FS}{BW^{1.5}}f\left(\frac{a_0}{W}\right)\right]^2\frac{(1-\nu^2)}{2\sigma_{ys}E}+\frac{0.4\ (W-a_0)\ V_p}{0.4W+0.6a_0+Z} \tag{9.1-8}$$

式中　Z——固定钳形夹的刀口高度。

S——弯曲跨距。

$f\left(\frac{a_0}{W}\right)$按式（9.1-5）计算或由表 9.1-2 查出。

b）对于直缺口紧凑拉伸试样：

$$\delta=\left[\frac{F}{BW^{0.5}}f'\left(\frac{a_0}{W}\right)\right]^2\frac{(1-\nu^2)}{2\sigma_{ys}E}+\frac{0.46\ (W-a_0)\ V_p}{0.46W+0.54a_0+Z+\ (c-W)} \tag{9.1-9}$$

c）对于阶梯形缺口紧凑拉伸试样：

$$\delta=\left[\frac{F}{BW^{0.5}}f'\left(\frac{a_0}{W}\right)\right]^2\frac{(1-\nu^2)}{2\sigma_{ys}E}+\frac{0.46\ (W-a_0)\ V_p}{0.46W+0.54a_0+Z} \tag{9.1-10}$$

式中 $f'\left(\frac{a_0}{W}\right)$ 可根据式（9.1-7）求出或由表 9.1-3 查出。

3）J_{IC} 极限值的测定

① 首先应当指出，对阶梯缺口紧凑拉伸试样，$P-V$ 曲线与 $P-Q$ 曲线是重合的，因此可以采用测定的 $P-V$ 曲线直接进行 J 值计算。但是对于三点弯曲试样载荷线位移



Q（q）与裂纹嘴张开位移并不一致，因而不能采用 $P-V$ 曲线进行 J 值计算，而测定载荷线位移量是比较困难的。这是因为很难把实际载荷点的线位移与三个载荷点作用（加载和两个支撑点）试样上的弹塑性变形和加载机构的变形区分开来。不扣除后者这些变形，显然会加大实际载荷点的线位移值，给试验结果带来误差。

唯一可直接得到载荷线位移的方法是测量试样上任意两点的沿载荷方向的相对运动。例如可通过测量相对于试样不变形的某一坐标点与缺口尖端位移间的距离来获得线位移值 Q（q），如图 9.1-15 所示。实验表明当 q_m 等于或小于 $0.14W$ 值时，其精度可等于或小于 2%。

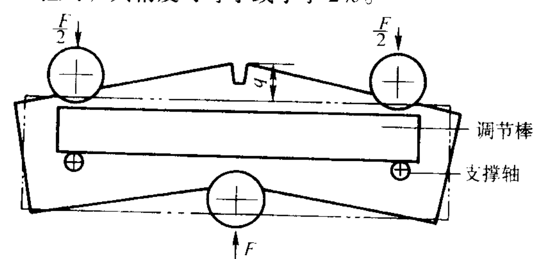


图 9.1-15　q 值的直接测量法

英国的该标准介绍了一种非直接测量三点弯曲试样位移值的方法，该方法是采用两个钳形夹，一个放置在缺口嘴部，另一个放置在缺口处上方（图 9.1-16），此时载荷线位移量可通过下式求出：

$$q=\frac{W(V_2-V_1)}{Z_2-Z_1} \tag{9.1-11}$$

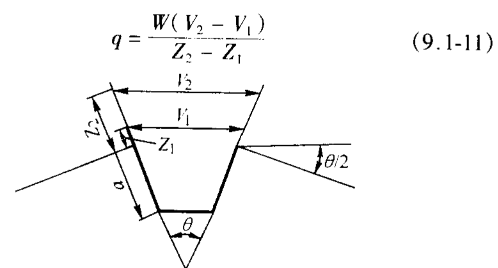


图 9.1-16　测量位移值的双钳形夹方法

② 参照图 9.1-11（1）～（5）曲线和裂纹扩展量 Δa。测量下述曲线记录点处的 F_c 和 q_c 或 F_u 或 q_u 以及 F_m 与 q_m 值。

a. 未发生明显 Pop－in 现象时的断裂点，如图 9.1-11（1）、（2）和（4）的断裂点。

b. 断裂前或首次达到最大载荷平台前的第一个 $d_n\%F$ 达到或超过 4%（对三点弯曲试样）或 5%（对于紧凑拉伸试样）的点。

c. 所有 Pop－in $d_n\%F$ 均未达到上述相应值的断裂点。

d. 参照图 9.1-11 的曲线（6），在达到最大载荷平台前未发生断裂和未产生对于三点弯曲试样 $d_n\%F$ 等于或大于 4%，对于紧凑拉伸试样等于或大于 5% 的 Pop－in 效应时，应计算和测量对应最大载荷点的 F_m 和 q_m 值。

③ 通过测量图 9.1-17 所示 $F-q$ 曲线下纵坐标与横坐标所包括的面积测量 J 值的塑性部分 U_p，它也可由整体面积扣除弹性变形面积方法得到，或通过积分计算得到。

④ J 值计算。通过 F_c、F_u、F_m 和 U_p 值可根据下式分别算出 J_c、J_u 和 J_m 值。

对于三点弯曲试样：

$$J=\frac{FS}{BW^{1.5}}f\left(\frac{a_0}{W}\right)^2\frac{(1-v^2)}{E}+\frac{2U_p}{B(W-a_0)} \tag{9.1-12}$$

式中，S 为跨距，$f\left(\frac{a_0}{W}\right)$ 可通过式（9.1-5）或计算或查表 9.1-2 获得。

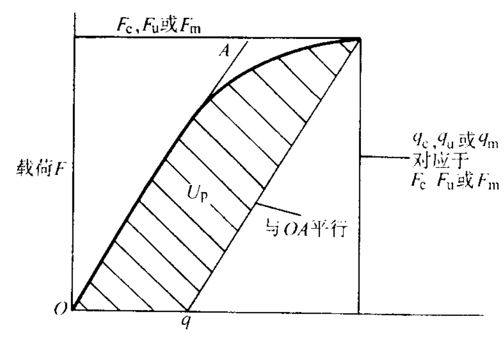


图 9.1-17　J 积分测量的 U_p 测定

对于阶梯缺口紧凑拉伸试样：

$$J=\left[\frac{F}{BW^{0.5}}f\left(\frac{a_0}{W}\right)\right]^2\frac{(1-v_2)}{E}+\frac{n_pU_p}{B(W-a)} \tag{9.1-13}$$

式中 $f\left(\frac{a_0}{W}\right)$ 可根据式（9.1-7）或查表 9.1-3 获得。

$$n_p=2+0.522\left(1-\frac{a_0}{W}\right) \tag{9.1-14}$$

"金属材料焊缝的断裂韧度测定 PartII" 是金属材料断裂韧度测定 PartI 的补充，即测试方法仍沿用 PartI 的测试方法，但做了一定的修改和补充，具体的程序如图 9.1-18 所示。

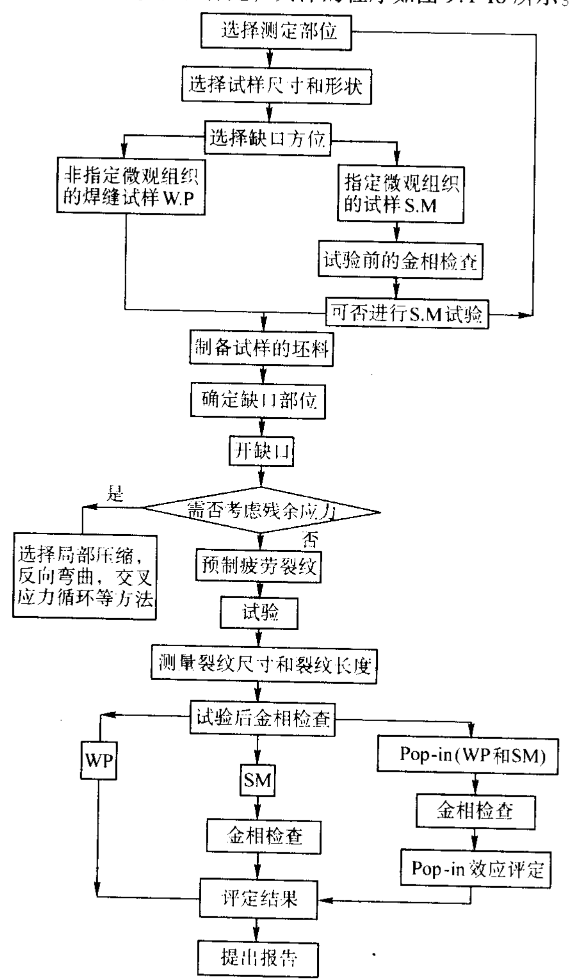


图 9.1-18　焊缝断裂韧度的测试程序

（4）试样设计

① 试样分为两种：一种为只需考虑焊缝宏观位置，不考虑微观组织的试样（WP）和需测定特定金相组织断裂韧性的试样（SM），后者需确认沿全厚度或 75% 厚度上是否存有待试的特定金相组织。两种类型试验缺口尖端位置如图



9.1-19 和图 9.1-20 所示。图中的字母代号如图 9.1-21 所示。

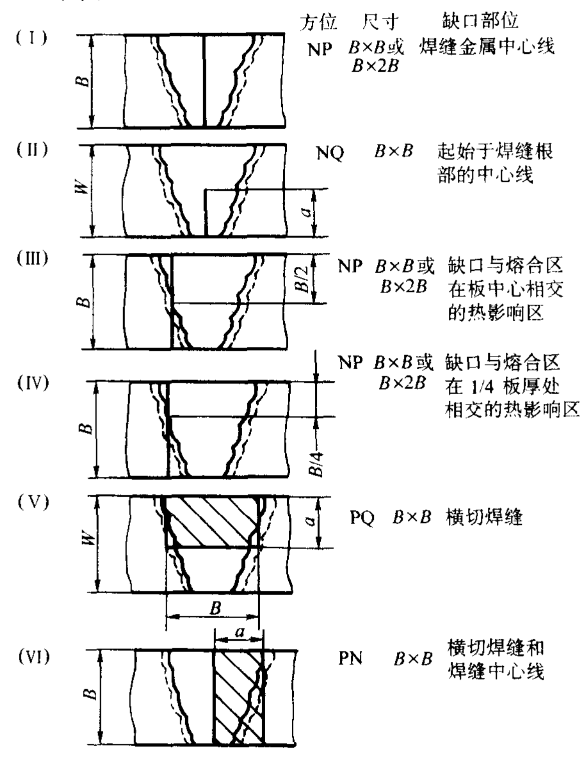


图 9.1-19　WP 试样示例

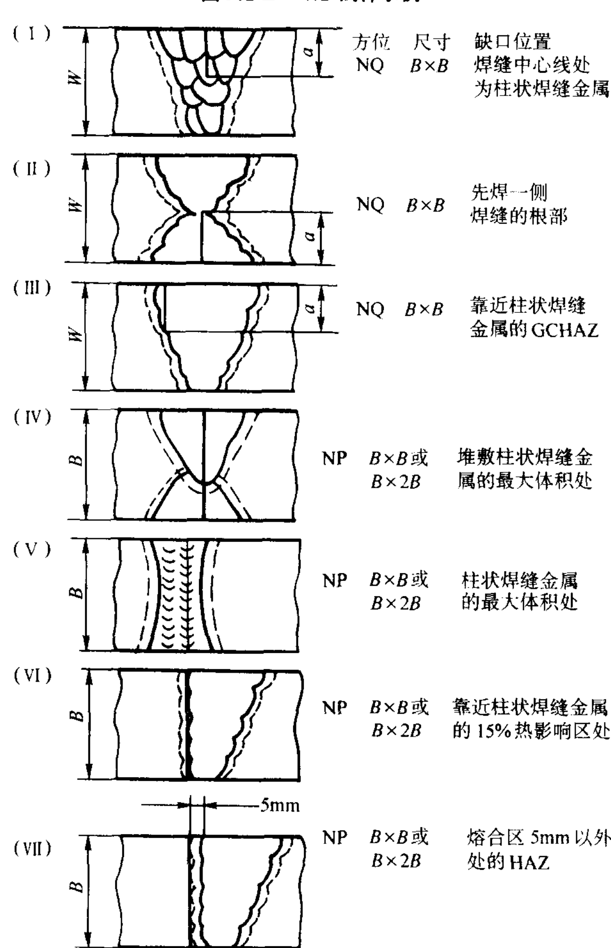


图 9.1-20　SM 试样示例

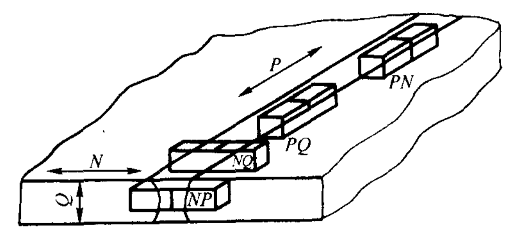


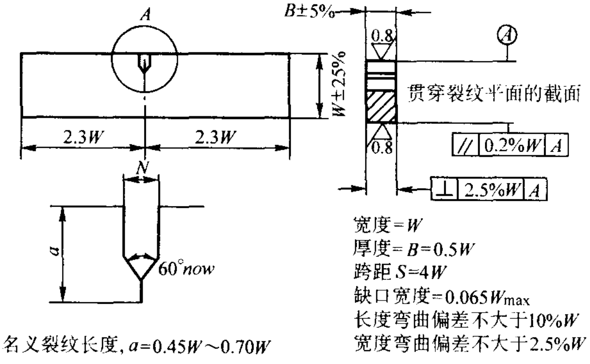
图 9.1-21　焊缝断裂韧度试样的不同裂纹平面

N—垂直焊缝方向；*P*—平行焊缝方向；*Q*—焊缝厚度方向

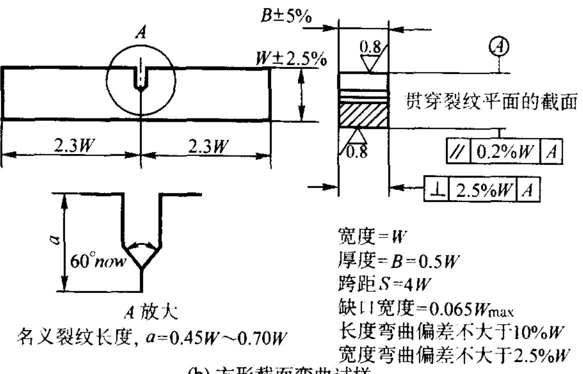
注：*NP* 和 *PN* 为贯穿厚度缺口试样，*NQ* 和 *PQ* 为表面缺口试样

第一个字母表示裂纹平面的方向，第二个字母表示裂纹扩展的方向

② 试样同样分紧凑拉伸型和三点弯曲型。后者尺寸要求与母材相比有所放宽，如图 9.1-22 所示，主要为 $a_0/w=0.45\sim0.70$，且对 COD 和 *J* 试验裂纹尖端不平度由 10% a_0 放宽到 20% a_0，但对于紧凑拉伸型试验均按 PartI 要求不变。



(a) 长方形截面试样



(b) 方形截面弯曲试样

图 9.1-22　长方形和方形弯曲断裂韧度试验试样尺寸

允许的接头不平度、变形和管道试样的弧度如图 9.1-23 所示，焊缝加高厚度要去掉。对于全厚度试样加工量越少越好，以保证试验结果接近全尺寸厚度试验结果。对于非等厚焊接接头，如厚度差越出 10%，则需按较薄厚度一侧尺寸加工试样，并在报告中予以说明原始厚度和加工后厚度情况。对于不平直的试样可采用局部弯曲方法在加工缺口前予以矫直。注意由加载点或支撑点至焊缝缺口部位距离至少为厚度 *B*。*NP* 和 *NQ*（图 9.1-21）试样缺口应保持与焊缝平行。

（5）试验前的金相检查

对于 SM 试样为保证预制的疲劳裂纹尖端部位具有待试的微观组织，应在试板上垂直焊缝方向至少制备两块试片，经打磨和腐蚀后进行金相检查，并记录其位置。对于贯穿厚度裂纹尖端部位应保证在 75% 厚度范围内有供试微观组织存在。对于表面裂纹则要求距裂纹尖端 0.5 mm 以内具有供试微观组织存在。否则认为该试板无效，需重新制备。对于热

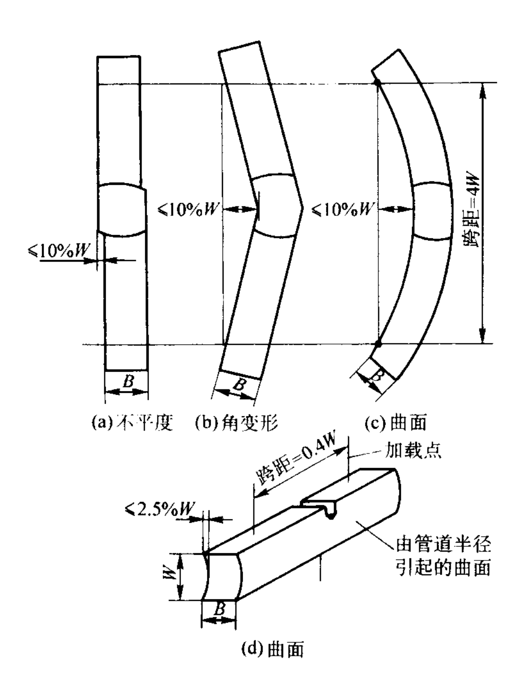


图 9.1-23　弯曲试验所允许的几种误差

影响区试样更提出了附加要求，即应绘出微观组织形貌图，对于贯穿厚度裂纹要对 75% 厚度范围内待试微观组织百分数进行统计计算。如图 9.1-24 中的柱状焊缝金属应按图 9.1-25 所示的方法进行统计。而对于表面裂纹试样要求在韧带上 a_0/w 范围内有待试微观组织存在。

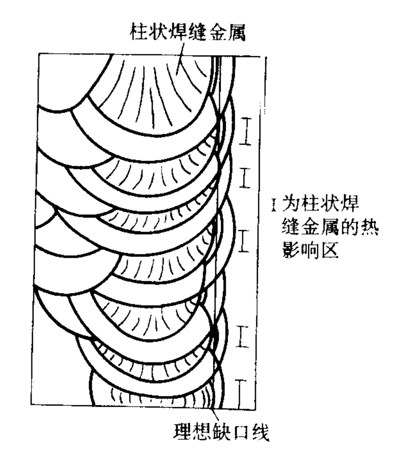
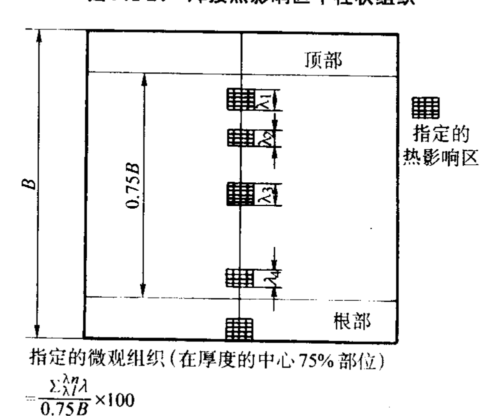


图 9.1-24　焊接热影响区中柱状组织



$= \frac{\sum \lambda_{?} \lambda}{0.75B} \times 100$

图 9.1-25　热影响区的柱状微观组织分布统计计算法

(6) 预制疲劳裂纹

1) 方法和要求与 PartI 相同，但是对焊接试样其 F_f 和 K_f 应建立在焊接金属的力学性能基础上。对于热影响区试样，则应以接头最低拉伸性能部分为基础。

2) 任何焊后及消除应力热处理，均应在开疲劳裂纹前进行。

3) 由于焊接残余应力的影响，疲劳裂纹尖端很难保证平直，一般呈弯曲状，因此对于应力消除焊缝试样或者已确信焊缝残余应力不高的试样，可采用 PartI 推荐的方法制备疲劳裂纹，否则在开疲劳裂纹前要进行下述一些方法的处理。

① 局部压缩机械缺口尖端的韧性部分　研究表明，这种方法可很好地消除焊接残余应力和使其均匀化，因而可保证疲劳裂纹较为平直和对断裂韧性影响的降低。

具体局部压缩方法是对包括裂纹尖端在内的 88% ~ 92% 韧带部分用较硬的钢块进行挤压，使其产生 10% 的压缩塑性变形。可单面压缩，也可双面同时压缩。如图 9.1-26 所示。如采用双面压缩方法，应保证每面均产生 0.5% B 压缩塑性变形。也可采用压力较小的多次压缩方法。但应注意最后的压缩部位应在靠近裂纹尖端处。压缩结果的测量精度应保证为 0.025 mm 或 0.1% B 二者的最大者。压缩后可进行表面精加工，以便保证韧带部分光滑。

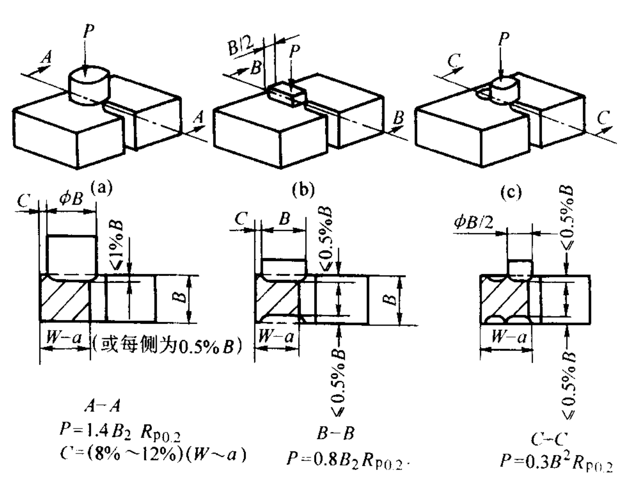


图 9.1-26　局部压缩处理方法

应当注意的是在断裂力学参量计算中，应采用压缩后的试样厚度进行计算。

② 反向弯曲方法　对于三点弯曲试样，在开疲劳裂纹前，采用与试验加载方向相反的加载方法，使缺口尖端部位受压，因而产生残余拉伸塑性变形和拉伸应力。

该反向弯曲载荷可按下式计算

$$K_{rb} = L\sigma_{ys}\sqrt{\frac{8\bar{\omega}_{rb}}{\pi}} \qquad (9.1\text{-}15)$$

式中，K_{rb} 为反向弯曲应力强度因子；L 为缺口拘束因子，对于方形试样该值取 2.3；$\bar{\omega}_{rb}$ 为反向弯曲载荷引起的塑性区尺寸。

标准虽然推荐了这种方法，但有关试验表明，它并不是有效的方法，且残余应力消除不大，因而对试验的断裂韧性结果有影响，所以有的研究者对这一方法提出疑问。

③ 复合应力循环特性 R 方法　标准中推荐采用不同应力循环特性 R 值，分两步进行疲劳裂纹制备。

第一步是在 $R = 0.1$ 循环特性下预制 1 mm 长疲劳裂纹，然后再在 $R = 0.7$ 循环特性下使疲劳裂纹扩展到预定的所需疲劳裂纹长度。在两种循环特性下采用同样的 K_f 值。



试验表明这种方法可获得较平直的疲劳裂纹前沿，但其对 $W-a_0$ 部位的残余应力降低不多，因而对断裂韧性值仍有一定影响。这种方法对高强钢应用较为有利。

采用上述一些方法处理后，尚需对裂纹尖端的残余应力值有所了解。因为只有残余应力值低到一定程度，其断裂韧性测出值才是可靠的，为此尚需进行下述补充试验。

即首先按上述方法制备好疲劳裂纹长度，再在 $R\leqslant 0.1$ 循环特性下使其扩展到在两个表面上的平均值 $\geqslant\{a+0.4(W-a)\}$（精度为 ±0.05 mm）。然后将试样打断，再用 PartI 所述的九点法分别测量 a_0 和由 a_0 到新的裂纹尖端 a_{af} 的尺寸，如果下列条件得到满足，则认为试样是有效的，即它间接证明残余应力值不高，且是均匀分布的。

a_0/W 满足标准要求；$a_{af}\geqslant\{a_0+0.4(w-a_0)\}$；对于 K_{IC} 试验或紧凑拉伸试样的 COD 和 J 积分试验，九点中任意两点的裂纹长度 a_0 差值 $\leqslant 10\%\,a_0$，同样 a_{af} 差值 $\leqslant 10\%\,a_{af}$；对于三点弯曲 COD 和 J 试验，内部七点的裂纹长度 a_0 差值均小于 $20\%\,a_0$，同样 a_{af} 差值小于 $20\%\,a_{af}$。

为了区别不同情况下测出的断裂韧性值，标准有如下规定。

对于热处理焊缝试样或虽为焊态和局部应力消除试样，但能证明它们具有较低的残余应力值，采用 K、J 和 δ 符号。焊态或局部应力消除试样，未采用上述任一方法进行处理时，采用 K^*、J^* 和 δ^* 符号。对采用上述方法处理且能证明裂纹尖端平直和残余应力值水平很低的试样，采用 K^M、J^M 和 δ^M 符号。虽采用上述方法处理，但未满足补充试验要求者，采用 K^{M*}、J^{M*} 和 δ^{M*} 符号。

（7）试验方法程序及计算方法

试验方法程序基本上仍按 PartI 方法进行，但采用公式计算断裂韧性值时，应注意下述事项。

1）材料拉伸力学性能的选择　当裂纹尖端位于焊缝金属中时，应采用全焊缝金属试样测出其拉伸力学性能，当裂纹尖端位于热影响区内时，应当采用热影响区的拉伸力学性能，或采用母材和焊缝二者中较高的拉伸力学性能。

2）对于碳钢和碳－锰钢当不能直接测量有关拉伸力学性能时，标准推荐了以硬度值换算拉伸性能的方法。

下式表述了硬度与室温屈服强度的关系。

母材：$160<HV<495$　　$\sigma_{ys}=3.28HV-221$ MPa

焊缝：$150<HV<300$　　$\sigma_{ys}=3.15HV-168$ MPa

下式表述了硬度与室温下抗拉强度的关系。

母材和焊缝金属

$100<HV<250$　σ_{Tsp}（母材抗拉强度）或 σ_{Tsw}（焊缝抗拉强度）$=3.3HV-8$ MPa

$250<HV<400$　σ_{Tsp} 或 $\sigma_{Tsw}=3.15HV+93$ MPa

室温与低温间的屈服强度关系可用下述公式表述：

$$\sigma_{ysT}=\sigma_{ys}\text{（室温下）}+\frac{10^5}{(491+1.8T)}-189\ \text{MPa}$$

式中，T 为断裂力学试验温度，℃。

3）对于对应于焊缝金属裂纹产生的 COD（δ）试验（即 F_c，V_c，F_u，V_u）尚需满足下述要求。

当裂纹位于焊缝中心时，要求焊缝高度 $2h$ 与 75%厚度范围内韧带尺寸的比值应大于 0.2，即：

$2h/(W-a_0)>0.2$［见图 9.1-27（a），（b）］

当裂纹不位于焊缝中心时，则要求裂纹平面到最近熔合线的距离大于 0.1，即

$2h/(W-a_0)>0.1$［见图 9.1-27（c），（d）］

4）对焊缝金属强度匹配即焊缝金属屈服强度与母材金属屈服强度之比的限定值为：

对于 COD（δ）试验　$0.5<\sigma_{ysw}/\sigma_{ysp}<1.5$

对于 J 积分试验　　$0.75<\sigma_{ysw}/\sigma_{ysp}<1.25$

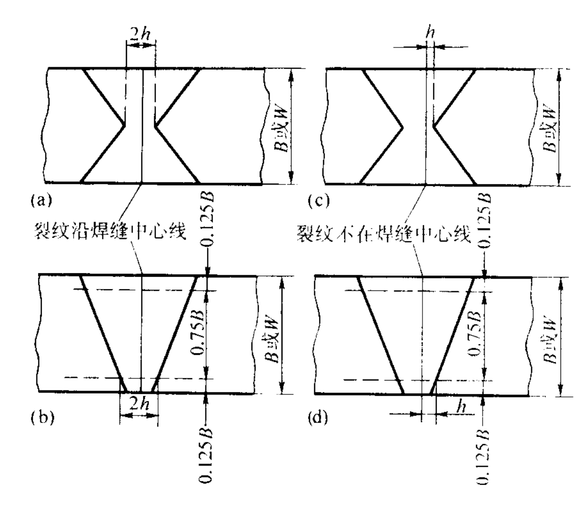


图 9.1-27　焊缝中 h 和 $2h$ 的定义

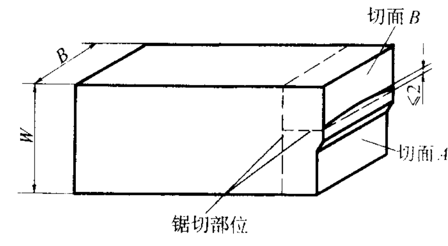
有关研究表明，当 $\sigma_{ysw}/\sigma_{ysp}$ 大于 1.5（对于 δ）或 1.25（对于 J）试验结果值将高出 ±10%误差，而当 $\sigma_{ysw}/\sigma_{ysp}$ 小于 0.5（对于 δ）和 0.75（对于 J）试验结果值将低出 ±10%误差。

需注意的是，对于热影响区试验，并未提出上述 3）和 4）要求，但在试验报告中要分别指出焊缝屈服强度和母材屈服强度。

（8）试验后的金相检查

对于 *SM* 试验，为了确认裂纹尖端的实际位置是否在待试微观组织内，试验后应进行金相检查，方法是从含有断裂表面部分试样切下试片，当检查热影响区试样时，应从焊缝一侧切下含有热影响区的试片。

对于贯穿厚度缺口试样，按图 9.1-28 所示的方法切取、注意要保证在 75%厚度范围内切面至裂纹尖端的深度最大为 2 mm（如图 9.1-28 所示）。之后对图 9.1-28 所示剖面线截面打磨，抛光进行金相检查，即用光学显微镜观查在 75%厚度范围内紧靠裂纹尖端处是否为待测微观组织并绘制图形指明微观组织部位的长度。



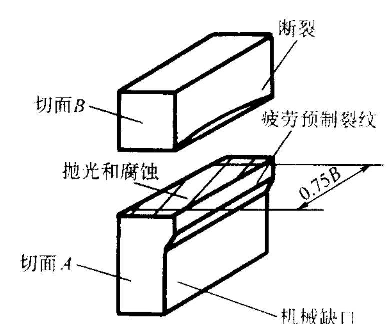


图 9.1-28　贯穿厚度缺口的试样切片的切取法

对于表面缺口试样，切片方法如图 9.1-29 所示。并对图示剖面线部位进行金相观查，如果待测微观组织位于裂纹尖端前面，则应测出该距离 s（见图 9.1-30）。该距离不得大于 0.5 mm。

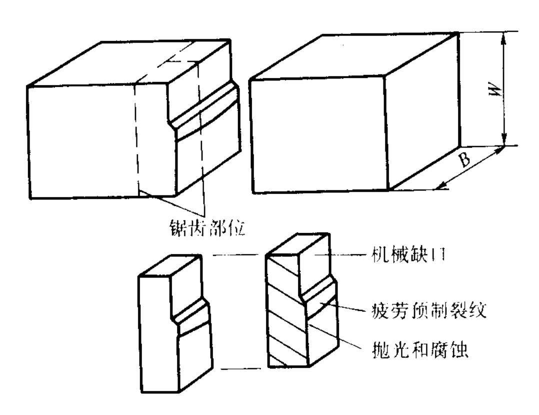


图 9.1-29 表面缺口试样的切片切取法

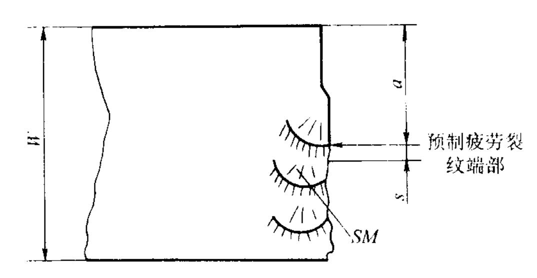


图 9.1-30 *SM* 表面缺口试样中的 *s* 测量

(9) Pop - in 效应评定

在 BS7448PartⅠ 所叙述的 Pop - in 评定准则对均质材料来说是有效的，但应用于焊缝金属就不一定合适。大量试验表明，对于焊缝试验 Pop - in 尺寸可能与存在于裂纹尖端的脆性材料长度有关。裂纹尖端部位作少许变动，就会改变 Pop - in 尺寸。因此对焊缝试验提出了较为详细的 Pop - in 评定规则，即除非下降载荷和位移量均小于 1% 可忽略不计外，其他情况均需用金相检查，断口分析确认。

1）断口分析　对断裂两表面仔细检查，确认在疲劳裂纹平面内有无脆性裂纹止裂现象。并测出该脆性裂纹扩展量（Δa_{Pop}）如图 9.1-31 所示，如不存在脆性裂纹止裂痕迹，则 Pop - in 效应评定仍按 Part Ⅰ 推荐方法评定。

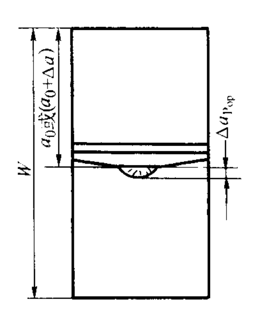


图 9.1-31 Δa_{Pop}的测量

2）金相检查　对含有脆性裂纹止裂痕迹的两断面的其中一块用光学显微镜或扫描电镜检查，确认裂纹起始部位（如果裂纹尖端位于热影响区内，需检查靠近焊缝一侧）之后对于贯穿厚度缺口试样在垂直疲劳裂纹平面上，对起始点进行金相观查，如图 9.1-32 剖面线部分所示。对于表面缺口试样检查面如图 9.1-33 剖面线部位所示。

3）评定　对于贯穿厚度缺口试样，需测量裂纹产生处与裂纹前沿平行的待评微观组织长度 d_1 和在 75% 厚度范围内与裂纹前沿不相交的相似的微观组织长度，记录其最大值 d_2（如图 9.1-34 所示）。对于表面缺口试样，要测量产生 Pop - in 的微观组织整体长度（d_1），如图 9.1-35 所示，注意该长度只是位于疲劳裂纹尖端前面的微观组织长度。

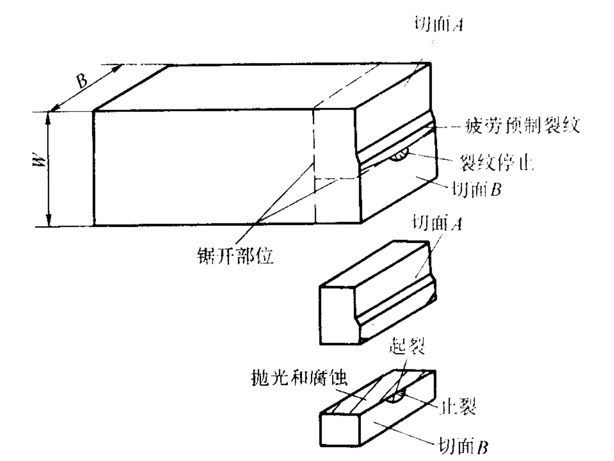


图 9.1-32 贯穿厚度缺口试样的断裂起始点检测

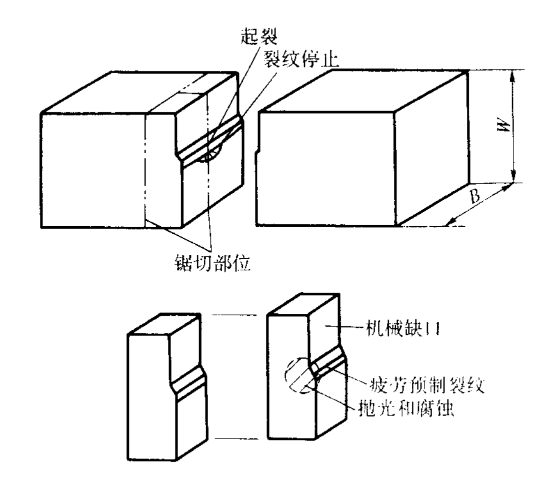
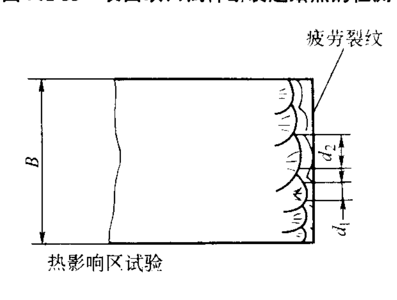


图 9.1-33 表面缺口试样断裂起始点的检测



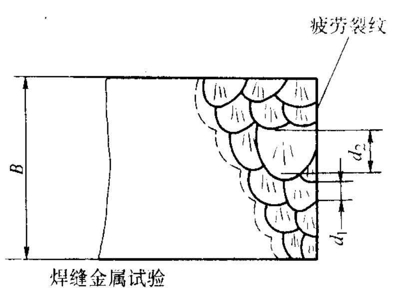


图 9.1-34 贯穿厚度缺口的 d_1 和 d_2 的测量

根据金相检查，判断 Pop - in 现象可忽略与否。

① 对于贯穿厚度缺口试样，按 PartⅠ 方法计算的 $d_n\%F$，如小于 5% 且 $d_1 \geq d_2$，则可忽略此 Pop - in 效应。

② 对于表面缺口试样，$d_n\%F$ 小于 5%，$\Delta a_{Pop} \leq d_1$，则可忽略此 Pop - in 效应。即只有当 $d_2 > d_1$ 或 $d_1 < \Delta a_{Pop}$ 时，该 Pop - in 效应不能忽略。



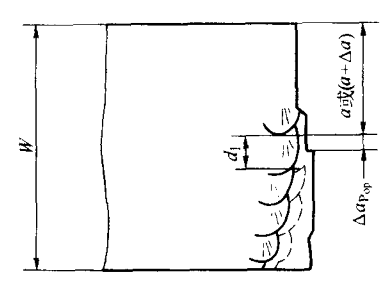


图 9.1-35　表面缺口试样的 d_1 测量

在测定金属材料裂纹稳定扩展阻力曲线及启裂值标准中更作了详细说明。

该标准中可采用两种测定裂纹扩展的方法，即多试样法和单试样法，但多试样法为确认的方法，多试样法最少需 6 个试样，试验中将 6 个试样分别加载到产生不同的位移，但需要同时测定 δ 和 J 两种阻力曲线，为了满足试验点在坐标上间隔的要求，可能需要更多的试样。试验时应测量试验规定某停机点前的载荷及位移，而试验应在试样裂纹前沿作出标记，以便在打断试样后能方便地测定裂纹稳定扩展值。

单试样法则可采用柔度法或电位法。

完成试验后要对试验数据进行分析，画出 δ 或 J 与裂纹扩展量 Δa 的坐标图，最后测出裂纹稳定扩展的启裂断裂韧度值。

(1) 试样

1) 试样类型　可分为三种类型。

长方形截面单边缺口三点弯曲试样，形状尺寸以及要求见图 9.1-36；直缺口紧凑拉伸试样，形状尺寸以及要求见图 9.1-37；阶梯缺口紧凑拉伸试样，形状尺寸以及要求见图 9.1-38。

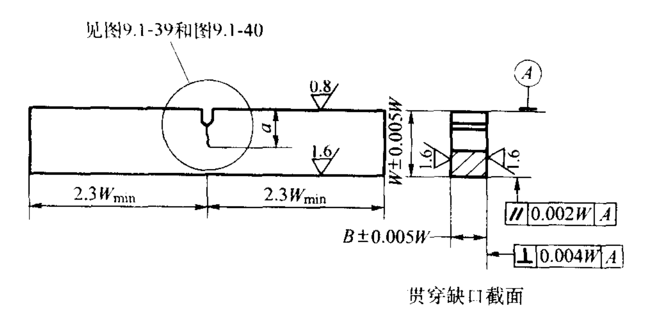


图 9.1-36　单边缺口三点弯曲试样尺寸及公差

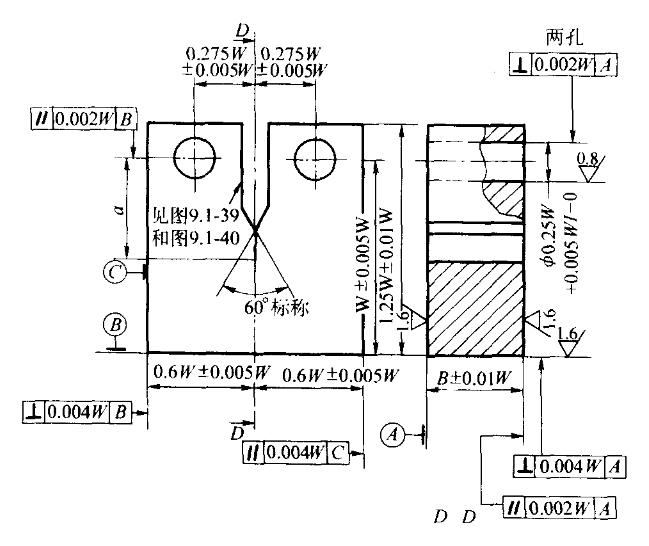


图 9.1-37　直缺口紧凑拉伸试样尺寸及公差

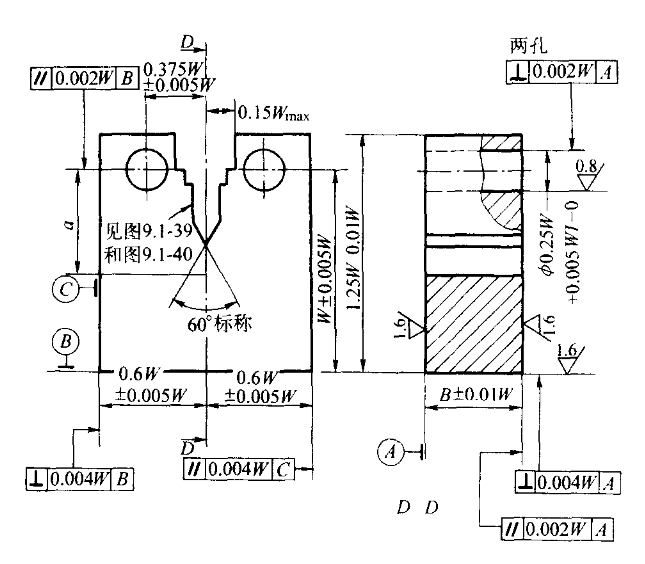


图 9.1-38　阶梯缺口紧凑拉伸试样尺寸及公差

2) 缺口及刀口　缺口及疲劳裂纹尖端形状见图 9.1-39。要求缺口宽度在 0.1～0.15 mm 之间，磨削缺口的根部半径不大于 0.10 mm，如采用锯加工或线切割工艺时，缺口尖端宽度不大于 0.15 mm，为了加工方便可采用阶梯状缺口（见图 9.1-40），刀口可采用附着型或试样内部直接开出型（见图 9.1-41）。

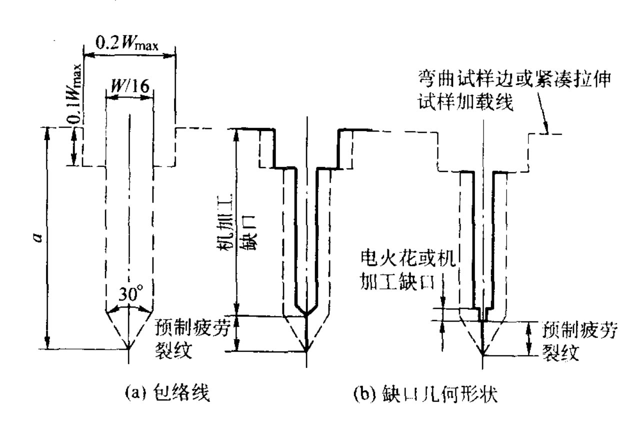


图 9.1-39　缺口及疲劳裂纹尖端形状

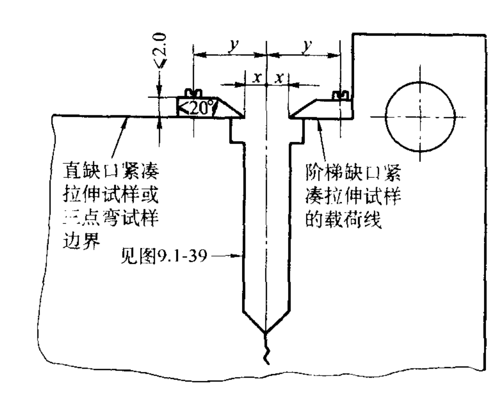


图 9.1-40　内置刀口及相应的缺口几何形状

3) 疲劳裂纹要求　缺口尖端的疲劳裂纹长度为 1.3 mm 或 2.5% 的试样高度或宽度 W 两者中的大者。

缺口加疲劳裂纹长度 a_0 与 W 之比 $a_0/W = 0.45 \sim 0.70$，两表面上的 a 之差应小于裂纹长度平均值 a_0 的 15%。

4) 厚度　对于多试样方法，如果试样厚度需等于结构截面厚度时，可采用原厚或裂纹侧面两种形式。而在其他情

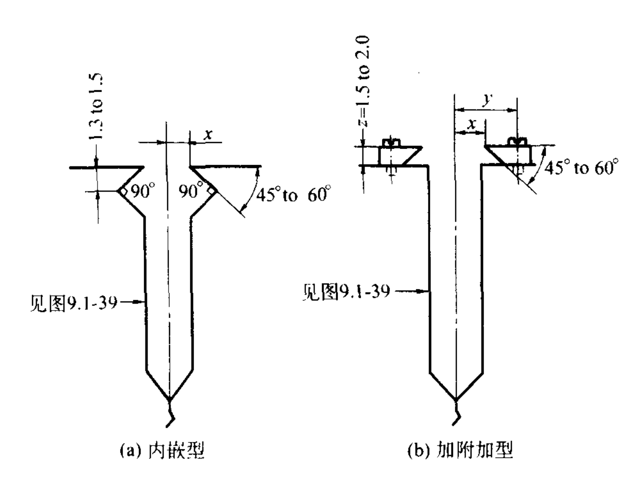


图 9.1-41 外置刀口及相应的缺口几何形状

况下，则需采用沿裂纹侧面开槽试样（见图 9.1-42），此时两侧槽的深度应相等，侧槽顶角 α 为 30°～90°，侧槽端部半径为 0.4 mm±0.2 mm，槽深度尺寸为 $B-B_N=0.20B$（即每面为 $0.1B$），B_N 为净截面厚度。

（2）试样选择

对于 $\delta-R$ 曲线，三种试样均可采用。对于 $J-R$ 曲线，阶梯缺口紧凑拉伸试样可直接测量出载荷线位移法，而对于三点弯曲试样，可直接测量或间接测量载荷线位移值，

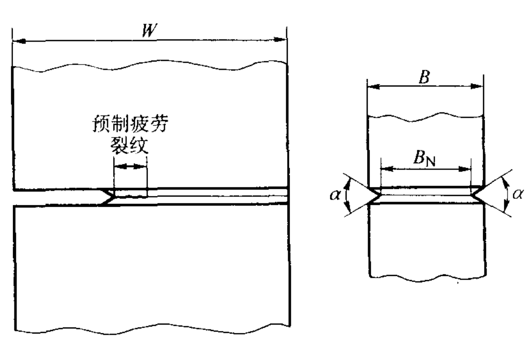


图 9.1-42 侧面开槽试样

但对于直型缺口紧凑拉伸试样，则需通过缺口处张开位移值换算出载荷线缺口位移值。

（3）预制疲劳裂纹

预制疲劳裂纹的最大载荷 F_f，对于三点弯试样：

$$F_f=\frac{0.8B\ (W-a_0)^2}{S}\times R_{P0.2B} \qquad (9.1\text{-}16)$$

式中，$R_{P0.2B}$对应 0.2% 伸长率时的载荷，MPa。

和 $$F_f=1.6\times10^{-4}E\left\{\frac{(WBB_N)^{0.5}}{g_1\ (a_0/W)}\right\}\times\frac{W}{S} \qquad (9.1\text{-}17)$$

二者中的小者。

式中

$$g_1(a_0/W)=\frac{3(a_0/W)^{0.5}\{[1.99-(a_0/W)]\{1-(a_0/W)\}\{2.15-3.93(a_0/W)+2.7(a_0/W)^2\}\}}{2\{1+2(a_0/W)\}\{1-(a_0/W)\}^{1.5}} \qquad (9.1\text{-}18)$$

$g_1(a_0/W)$的一些特殊值可由表 9.1-4 查出。

对于紧凑拉伸试样：

$$F_f=\frac{0.6B\ (W-a_0)^2}{(2W+a_0)}\times R_{P0.2B} \qquad (9.1\text{-}19)$$

和 $$F_f=1.6\times10^{-4}E\left\{\frac{(WBB_N)^{0.5}}{g_2(a_0/W)}\right\}\times\frac{W}{S} \qquad (9.1\text{-}20)$$

二者中的小者。

式中

表 9.1-4 用于紧凑拉伸试样的 $g_1(a_0/W)$

a_0/W	$g_1\ (a_0/W)$	a_0/W	$g_1\ (a_0/W)$	a_0/W	$g_1\ (a_0/W)$	a_0/W	$g_1\ (a_0/W)$
0.450	2.29	0.540	3.04	0.630	4.25	0.720	6.50
0.455	2.32	0.545	3.09	0.635	4.34	0.725	6.67
0.460	2.35	0.550	3.14	0.640	4.43	0.730	6.86
0.465	2.39	0.555	3.20	0.645	4.53	0.735	7.06
0.470	2.43	0.560	3.25	0.650	4.63	0.740	7.27
0.475	2.46	0.565	3.31	0.655	4.73	0.745	7.48
0.480	2.50	0.570	3.37	0.660	4.84	0.750	7.71
0.485	2.54	0.575	3.43	0.665	4.95	0.755	7.95
0.490	2.58	0.580	3.50	0.670	5.06	0.760	8.20
0.495	2.62	0.585	3.56	0.675	5.18	0.765	8.47
0.500	2.66	0.590	3.63	0.680	5.30	0.770	8.75
0.505	2.70	0.595	3.70	0.685	5.43	0.775	9.04
0.510	2.75	0.600	3.77	0.690	5.57	0.780	9.35
0.515	2.79	0.605	3.85	0.695	5.71	0.785	9.68
0.520	2.84	0.610	3.92	0.700	5.85	0.790	10.04
0.525	2.89	0.615	4.00	0.705	6.00	0.795	10.41
0.530	2.94	0.620	4.08	0.710	6.16	0.800	10.80
0.535	2.99	0.625	4.16	0.715	6.32		

$$g_2(a_0/W)=\frac{\{2+(a_0/W)\}\{0.886+4.64(a_0/W)-13.32(a_0^2/W^2)+14.72(a_0^3/W^3)-5.6(a_0^4/W^4)\}}{\{1-(a_0/W)\}^{1.5}} \quad (9.1\text{-}21)$$

$g_2(a_0/W)$的一些特殊值可由表9.1-5查出。

表9.1-5　用于紧凑拉伸试样的 $g_2(a_0/W)$

a_0/W	$g_2(a_0/W)$	a_0/W	$g_2(a_0/W)$
0.450	8.34	0.630	15.44
0.455	8.46	0.635	15.77
0.460	8.58	0.640	16.12
0.465	8.70	0.645	16.48
0.470	8.83	0.650	16.86
0.475	8.96	0.655	17.25
0.480	9.09	0.660	17.65
0.485	9.23	0.665	18.07
0.490	9.37	0.670	18.52
0.495	9.51	0.675	18.97
0.500	9.66	0.680	19.44
0.505	9.81	0.685	19.94
0.510	9.96	0.690	20.45
0.515	10.12	0.695	20.99
0.520	10.29	0.700	21.55
0.525	10.45	0.705	22.14
0.530	10.63	0.710	22.75
0.535	10.80	0.715	23.40
0.540	10.98	0.720	24.07
0.545	11.17	0.725	24.77
0.550	11.36	0.730	25.51
0.555	11.56	0.735	26.29
0.560	11.77	0.740	27.10
0.565	11.98	0.745	27.96
0.570	12.20	0.750	28.86
0.575	12.42	0.755	29.80
0.580	12.65	0.760	30.80
0.585	12.89	0.765	31.86
0.590	13.14	0.770	32.97
0.595	13.39	0.775	34.15
0.600	13.65	0.780	35.40
0.605	13.93	0.785	36.72
0.610	14.21	0.790	38.12
0.615	14.50	0.795	39.61
0.620	14.80	0.800	41.20
0.625	15.11		

同时尚需注意以下几点。

① 疲劳载荷循环比 $r=0-0.1$，但为了加速扩展，循环的前几次可在较低载荷的 $r=-1$ 下进行疲劳裂纹预制。

② 对三类试样均要求 a_0/W 在0.45~0.70之间。

③ 疲劳裂纹长度为1.3 mm或2.5% W 两者中大者。

④ 两表面疲劳裂纹长度差不超过两表面裂纹平均值的15%。

(4) 多试样试验程序

1) 整体要求

① 试样数量最少为6个。

② 在缺口部位沿裂纹扩展方向至少需测量三个等分点处厚度以其平均值作为厚度 B，或为 B_N，其精度值为 ±0.025 mm或±0.1%两者中的大者。

③ 在距裂纹面10%以内的 W 处，测量三个等分点处 W，以其平均值作为高度（或宽度）W，其精度为±0.025 mm或±0.1%两者中的大者。

④ 测量刀口厚度尺寸 Z，若 Z 小于 $0.002a$，则可忽略之，对于试样上开出刀口情况，取 $Z=0$。

2) 试验装置及测量　三点弯曲和紧凑拉伸试验装置分别按图9.1-43和图9.1-44标出的要求，需采用标定过的加压装置及位移传感器进行试验。

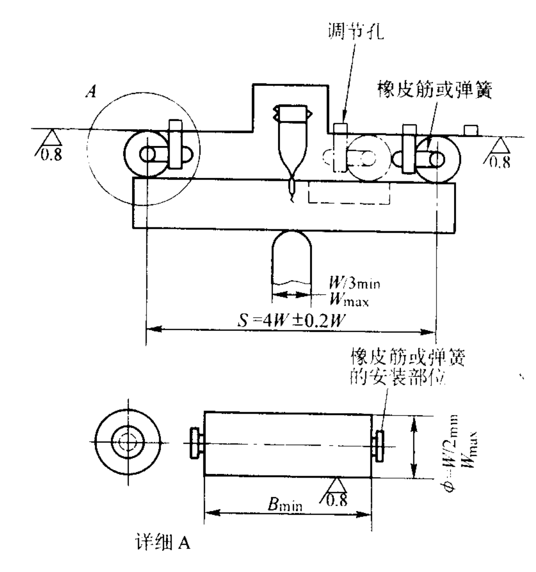


图9.1-43　三点弯试验装置

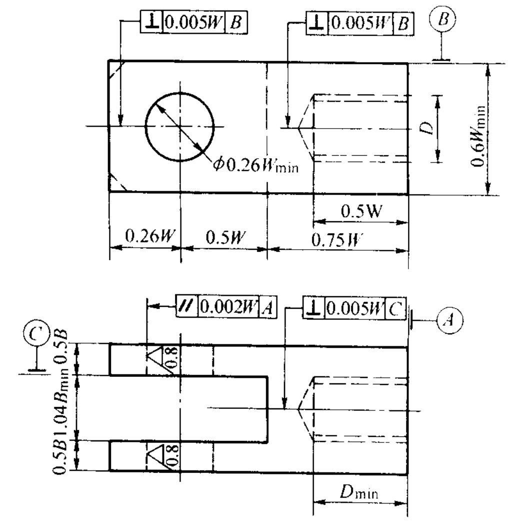


图9.1-44　紧凑拉伸试验装置设计

在加载时，对第一个试样要加载到对应于刚超出最大载



荷时的位移值，之后将载荷恢复至0。通过发蓝或附加疲劳试验法对裂纹扩展值留印。进行附加疲劳试验时，取应力循环比 $r=0.6$，以避免由于裂纹闭合影响损伤断裂表面，而其载荷不超出3/4试验时的最大载荷值，最后将试样在低温下压断，观察和测量断裂表面。

按图9.1-45或图9.1-46所示确定原始裂纹长度。将含裂纹截面 a 等分来测量各裂纹长度，注意的是表面两点 a_1 和 a_9 都是距最小净截面 B_{min} 内1% B 处（见图9.1-45、图9.1-46），计算原始裂纹长度的方法是先将表面两点的 a_1 和 a_9 取平均值，然后再与内部7个测量点的值相加，按下式计算平均值 a_0，a_0 即定义为原始裂纹长度。

$$a_0=\frac{1}{8}\left(\frac{a_1+a_9}{2}+\sum_{i=2}^{8}a_i\right) \tag{9.1-22}$$

该原始裂纹长度 a_0 应满足下述要求。

① $a_0/W=0.45\sim0.70$。

② a_0 与9个测量点中任一个裂纹长度的差应小于10% a_0。

③ 疲劳裂纹尖端任一部分距缺口尖端不小于1.3 mm或2.5% W 两者中大者。

④ 疲劳裂纹与机械缺口应在图9.1-39所示的对应于 a_0/W 的包络线内。

3）稳定裂纹扩展 Δa 的测量　采用与上述测量 a_0 相同的方法测量 Δa，按式（9.1-22）计算出9点的平均裂纹扩展值 Δa，9个测量点的最大、最小裂纹扩展值之差不应大于20% Δa 或0.15 mm二者中的大者。

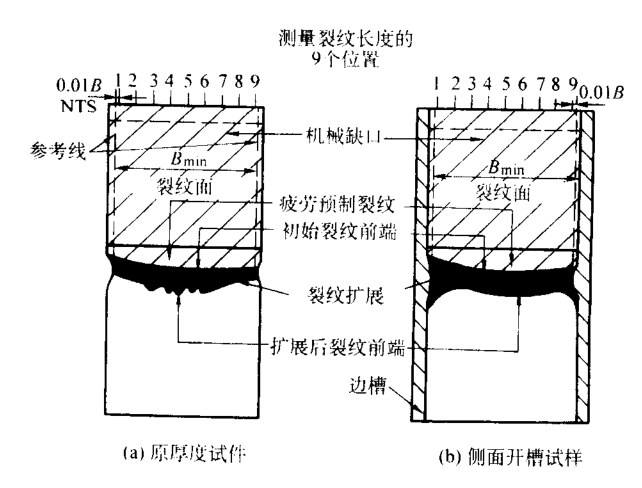


图9.1-45　单边缺口三点弯试样裂纹长度测量

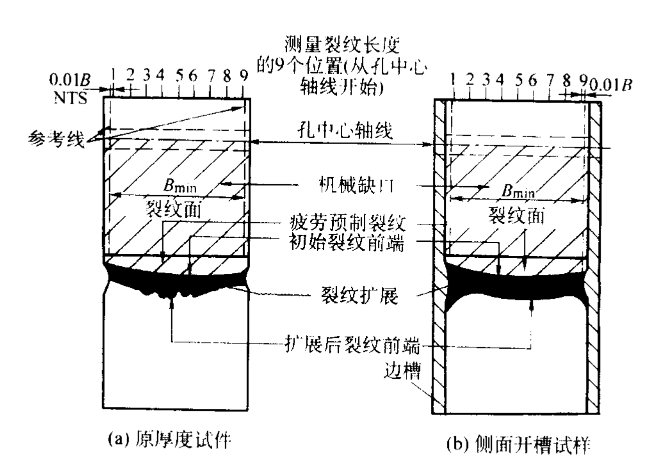


图9.1-46　紧凑拉伸试样裂纹长度测量

（5）单试样法

可采用柔度法、电位法等方法进行试验，但至少需3个试样。如果采用卸载柔度法测定裂纹扩展，则需采用侧面开槽试样；如果采用电位法则视情况而定。

试验中，其中一个试样应力加载到裂纹扩展极限 Δa_{max}，

对于 $\delta-R$ 曲线，$\Delta a_{max}=0.25\ (W-a_0)$；

对于 $J-R$ 曲线，$\Delta a_{max}=0.10\ (W-a_0)$

第二个试样应力加载到超出钝化线0.1~0.3 mm（见图9.1-47），第三个试样加载到裂纹扩展区的中央左右，例如 $0.5\Delta a_{max}$ 左右。

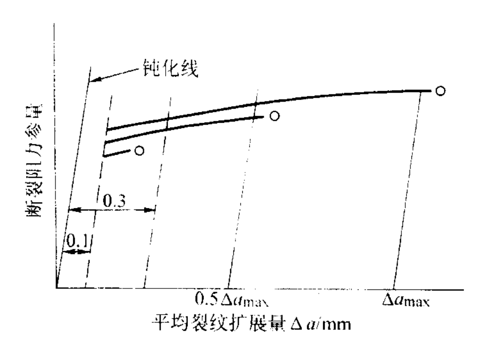


图9.1-47　单边缺口试样裂纹扩展要求

对于裂纹长度，采用与多试样法相同的测量方法，但每条裂纹长度与 a_0 之差不大于2% a_0，而裂纹扩展量均值 Δa 与每个测量点的裂纹扩展值之差应不大于15% Δa 或 ±0.15 mm两者中的大者。

（6）试验数据分析

多试样法应满足下列要求。

1）试验中如出现裂纹非稳定扩展或Pop-in现象，则对所有试验应按BS 7448 PartI进行分析，但仍有足够的裂纹稳定扩展数据，则仍可采用 $\delta-R$ 和 $J-R$ 曲线进行分析，但在试验报告中需标明用PartI测定的非稳定裂纹扩展数据。

2）δ 值的测定

① V_P 的测定，参见图9.1-48，计算和记录的缺口张开位移塑性部分 V_P，可采用作图法或分析法，作图法可采用手绘或计算机绘图；计算法采用弹性柔度技术，即从缺口整体张开位移值中扣除弹性张开位移 V_e 值。

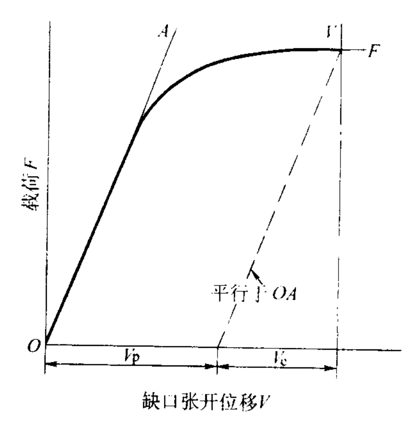


图9.1-48　作图法确定 V_P

② δ 值的计算

a. 对于三点弯曲试样：

$$\delta_{corr}=\frac{K^2\ (1-v^2)}{2ER_{P0.2}}+\frac{0.6\Delta a+0.4\ (W-a_0)}{0.6\ (a+\Delta a)\ +0.4W+z}\times V_P \tag{9.1-23}$$

式中，$K=\frac{FS}{W^{1.5}(BB_N)^{0.5}}\times g_1(a_0/W)$；$F$ 为试验中的载荷值；$g_1(a_0/W)$为应力强度函数按式（9.1-18）计算或查表9.1-4；z 为刀口厚度；V_P 为缺口张开位移中的塑性位移分量。

b. 对于阶梯缺口紧凑拉伸试样

$$\delta_{corr}=\frac{K^2(1-v^2)}{2ER_{P0.2}}+\frac{0.54\Delta a+0.46(W-a_0)}{0.54(a_0+\Delta a)+0.46W+z}\times V_P \tag{9.1-24}$$

式中，$K=\frac{F}{(BB_N W)^{0.5}}\times g_2(a_0/W)$；$g_2(a_0/W)$ 按式（9.1-21）计算或查表9.1-5。

c. 对于直缺口紧凑拉伸试样

$$\delta_{corr}=\frac{K^2(1-v^2)}{2ER_{P0.2}}+\frac{0.54\Delta a+0.46(W-a_0)}{0.54(a_0+\Delta a)+0.46W+(W_t-W)+z}\times V_P \tag{9.1-25}$$

式中，$K=\frac{F}{(BB_N W)^{0.5}}\times g_2(a_0/W)$；

注意上述公式中，如采用非开槽试样需以 B 代替 B_N。

3）J 值的测定

① U_P 的测定　通过测量试验记录的类似图9.1-49的面积来测定塑性功，此对应于 U_P 的面积可以由试验记录曲线直接测定，也可由计算机进行数值计算来求出。

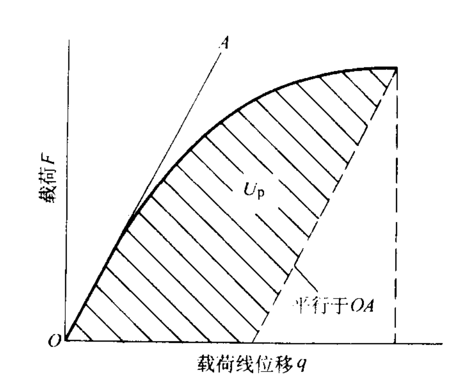


图9.1-49　确定 U_P

② J_{corr}的计算

$$J_{corr}=J_0\left\{1-\frac{(0.75\eta_P-1)}{(W-a_0)}\Delta a\right\} \tag{9.1-26}$$

式中，$J_0=\frac{K^2(1-v^2)}{E}+\frac{\eta_P U_P}{B_N(W-a_0)}$

对于单边缺口弯曲试样，$\eta_P=2$；

对于紧凑拉伸试样，$\eta_P=2+0.522(1-a_0/W)$；

对于单边缺口弯曲试样，$K=\frac{FS}{W^{1.5}(BB_N)^{0.5}}\times g_1(a_0/W)$；

对于紧凑拉伸试样，$K=\frac{F}{(BB_N W)^{0.5}}\times g_2(a_0/W)$；

F 为在试验期间施加的单调载荷；$g_1(a_0/W)$和 $g_2(a_0/W)$按式（9.1-18）和式（9.1-21）计算或者查表9.1-4和表9.1-5得到。

4）R 阻力曲线的建立

① 裂纹扩展极限 Δa_{max} 由下式确定：

对于 $\delta-R$ 阻力曲线，$\Delta a_{max}=0.25(W-a_0)$；

对于 $J-R$ 阻力曲线，$\Delta a_{max}=0.10(W-a_0)$。

② 钝化线斜率，根据试验数据画出钝化线

$$\delta=1.87\left(\frac{R_m}{R_{P0.2}}\right)\Delta a \tag{9.1-27}$$

$$J=3.75R_m\Delta a \tag{9.1-28}$$

式中，R_m 为试验温度下的抗拉强度，MPa。

③ 对应于按①计算的 Δa_{max} 部位，画出平行于钝化线的裂纹扩展排除线（见图9.1-50），在 $\Delta a=0.1$ mm 处画出平行于钝化线的排除线。

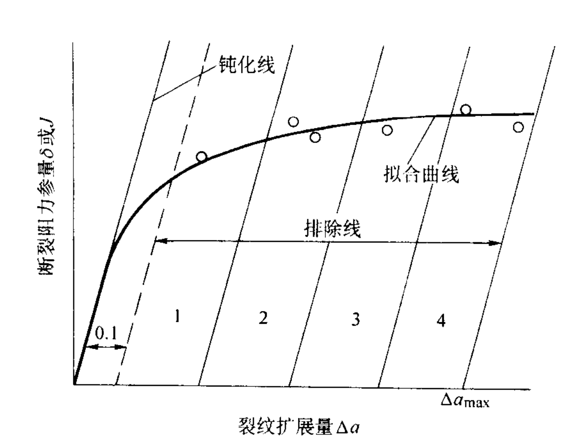


图9.1-50　数据间隔和拟合曲线

④ 最少需要6个点的数据来表征抗裂纹扩展性能，理论上讲，数据点在图9.1-50上的位置应该是等分的，因此在图9.1-50所示的4个裂纹扩展区间内，每个区间至少应有一个点的数据。

⑤ 用下述方程对 $\Delta a=0.1$ mm 到 Δa_{max} 排除线之间的数据点拟合曲线

$$\delta \text{或} J=m+l(\Delta a)^x \tag{9.1-29}$$

l、m、x 可按下述方法测定：

首先取从0.01～1之间的 x 值，间隔为0.01，然后对每一个 x 值按下式计算矫正系数 r：

$$r=\left[\sum\{y_i(\Delta a_i)^x\}-\frac{\sum\Delta a_i^x\sum y_i}{k}\right]\left[\left\{\sum y_i^2-\frac{(\sum y_i)^2}{k}\right\}\left\{\sum a_i^{2x}-\frac{(\sum a_i^x)^2}{k}\right\}\right]^{-0.5} \tag{9.1-30}$$

式中，k 为数据点的个数；y 为 J 或者 δ。

当 x 值具有最大矫正系数时，可得出最佳拟合曲线，确定 x 值后，按下式分别计算 m 和 l 的值：

$$l=\left\{\sum y_i^2-\frac{(\sum y_i)^2}{k}\right\}^{0.5}\left\{\sum\Delta a_i^{2x}-\frac{(\sum\Delta a_i^x)^2}{k}\right\}^{-0.5} \tag{9.1-31}$$

$$m=\frac{(\sum y_i-l\sum\Delta a_i^x)}{k} \tag{9.1-32}$$

应当说明，l 和 m 的计算结果均应大于或等于0，$0\leqslant x\leqslant l$，如果 l 或 m 取负值，则应当补充试验数据点。

⑥ 控制裂纹扩展的 δ 极限值。分别用下述二式计算 δ_{max} 值，并取其最小值。

$$\delta_{max}=\frac{(W-a_0)}{30} \tag{9.1-33}$$

$$\delta_{max}=\frac{B}{30} \tag{9.1-34}$$

在 $\delta-\Delta a$ 图上 δ_{max} 处建立横向排除线，如图9.1-51所示。



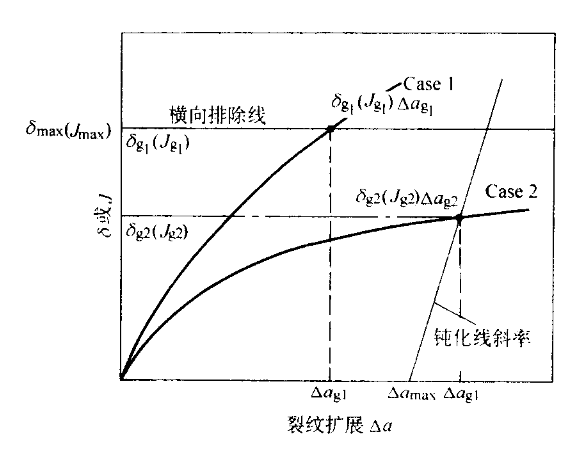


图 9.1-51 δ 和 J 极限值

图上示出两种材料情况，在拟合的曲线与 δ_{max} 排除线相交处给出 δ_{g1}、Δa_{g1}，此二值定义为 R 阻力曲线的上限值。同样，拟合曲线与 Δa_{max} 排除线的交点所得到的 δ_{g2}、Δa_{g2} 同样定义为 R 曲线的上限。

⑦ 控制裂纹扩展的 J 极限值。分别用下述二式计算 J_{max} 值，并取其最小值

$$J_{max} = (W - a_0)\frac{(R_{P0.2} + R_m)}{40} \tag{9.1-35}$$

$$J_{max} = B\frac{(R_{P0.2} + R_m)}{40} \tag{9.1-36}$$

同样按照上述⑥的方法，可以定义出 R 阻力曲线的 J_{g1}、Δa_{g1} 和 J_{g2}、Δa_{g2} 值。

5）断裂参量的测定

① 定义

a. $\delta_{0.2BL}$ 或 $J_{0.2BL}$ 仍表征从钝化线 0.2 mm 处断裂阻力参量，从工程角度，该处定义为启裂点，而无需采用扫描电镜确定 SZW（裂纹钝化引起的宽度增加值），即 $\delta_{0.2BL}$ 或 $J_{0.2BL}$ 表征启裂韧度。

b. $\delta_{0.2}$ 或 $J_{0.2}$ 表征包括裂纹尖端钝化在内的裂纹扩展 0.2 mm 处的断裂参量，在许多场合下该参量是有用的裂纹启裂的工程定义，与 $\delta_{0.2BL}$ 或 $J_{0.2BL}$ 相比，该值为较低界限值，对于高韧性材料，它可能是很低的值。

② δ 断裂参量求解

a. $\delta_{0.2BL}$ 求解　通过 $\delta-\Delta a$ 数据，按本章所叙述的方法画出钝化线和 R 拟合曲线之后在距钝化线 0.2 mm 处，画出一条与钝化线平行的直线，其与拟合曲线的相交点即为 $\delta_{0.2BL}$（如果此 $\delta_{0.2BL}$ 超出 δ_{max}，则此值无效），见图 9.1-52。

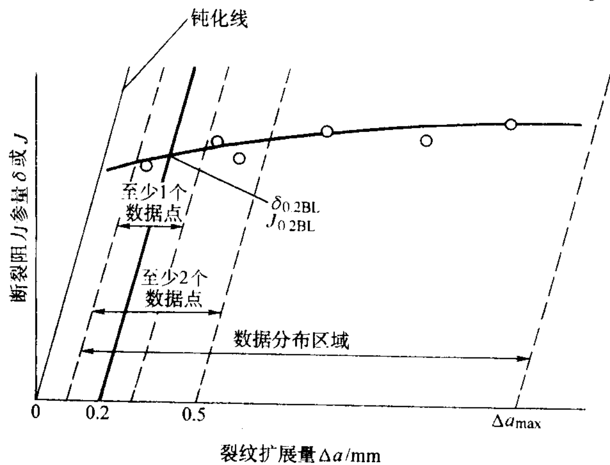


图 9.1-52 $\delta_{0.2BL}$ 和 $J_{0.2BL}$ 的导出

测定 $\delta-\Delta a$ 曲线的斜率 $(d\delta/da)_{0.2BL}$，假如钝化线的斜率 $(d\delta/da)_{BL}$ 小于 2 $(d\delta/da)_{0.2BL}$，则此 $\delta_{0.2BL}$ 值也无效。

b. $\delta_{0.2}$ 求解　根据 $\delta-\Delta a$ 数据图在 0.2 mm 裂纹扩展处，作出平行于纵坐标的直线，见图 9.1-53。该直线与拟合曲线的交点给出 $\delta_{0.2}$，按规定至少扩展量在 0.2～0.4 mm 之间有一个数据点，同时，假如此 $\delta_{0.2}$ 超出 δ_{max}，则此 $\delta_{0.2}$ 无效。

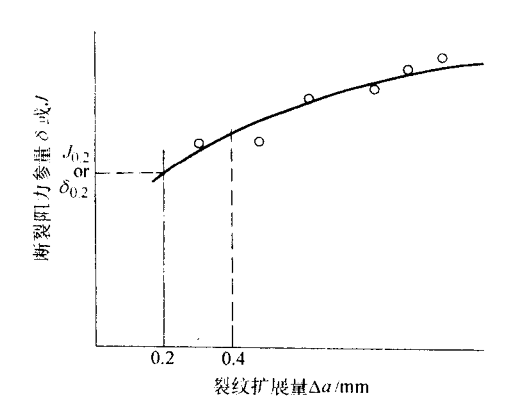


图 9.1-53 $\delta_{0.2}$ 和 $J_{0.2}$ 的导出

③ J 断裂参量　同理按求解 δ 断裂参量 $\delta_{0.2BL}$ 和 $\delta_{0.2}$ 的方法，可以确定 $J_{0.2BL}$ 和 $J_{0.2}$ 值，同样采用相同的方法，判定 $J_{0.2BL}$ 和 $J_{0.2}$ 的有效性。

2.3.2 止裂性能测试方法

目前在实际应用中，大多数采用转变温度型方法，断裂力学方法仍处于实验室研究阶段。前者可粗略地分为以罗伯逊试验为代表的包括 ESSO，双重拉伸试验在内的大型试验方法和以美国海军研究所（NRL）开发的落锤、动态撕裂和落锤撕裂等一系列中小型试验方法。由于国内开展大型止裂方法研究较少，本章将对中小型试验方法，即 NRL 开发的方法作较详细的介绍。

（1）落锤试验

该方法是美国海军研究所（NRL）于 1952 年提出的用来测量厚度大于 16 mm 钢板 NDT（无塑性转变温度）特性的试验方法。1969 年由美国材料试验学会予以标准化（ASTM E208-69），随后在其他一些国家如日本、澳大利亚也各自提出了落锤试验标准，我国也于 1986 年颁布了落锤试验标准 GB 6803-86。

落锤试验是动载简支弯曲试验，图 9.1-54 是试验的示意。试验前先在试样（ASTM E208-69 中有三种试样尺寸：即 P_1 型为 25 mm×90 mm×360 mm，P_2 型为 19 mm×50 mm×130 mm，P_3 型为 16 mm×50 mm×130 mm。在我国落锤试验标准中除 P_1、P_2、P_3 三种试样外，又增加了 P_4 = 12 mm×130 mm×50 mm，P_5 = 38 mm×90 mm×360 mm，P_6 = 50 mm×90 mm×360 mm 三种附加试样）受拉伸的表面中心，于平行长边方向堆焊一段长约 64 mm，宽约 13 mm 的脆性焊道（对于厚度超过标准试样的试板，应只从一面机加工至标准厚度，并将未加工表面作为受拉表面），然后在焊道中央垂直焊缝方向锯出一人工缺口。试验时把冷却至预定温度的试样缺口朝下放在标准砧座上，在砧座两支点中部有一限定试样在加载时产生挠度值的止挠块，使试样的最大弯曲角为 5°。当弯曲形变达到 3°时（此时试样的表面应力开始进入屈服），启裂焊道出现脆性裂纹。利用挡块再产生一个 2°的附加弯曲角（动态弯曲），其目的是测定金属存有一个非常尖锐缺口即裂纹时产生变形的能力。不同试样的试验温度间差为 5℃，试样的断裂最高温度定为 NDT 温度。按照标准规定，当冲击下产生的裂纹扩展到受拉面的两个棱边或一个棱边时



称为断裂。

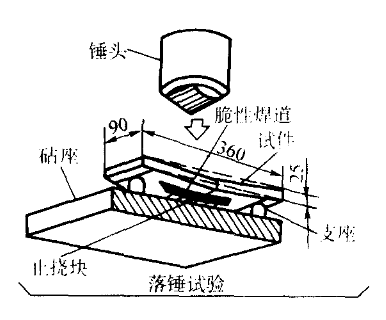


图 9.1-54 落锤试验示意图

落锤试验的其他两个温度参量为 FTE（弹性断裂转变温度）和 FTP（塑性断裂转变温度）。对于标准试样来说，已证实：

$$FTE = NDT + 33℃$$

$$FTP = FTE + 33℃ = NDT + 66℃$$

应当说明的是从落锤试验开发人佩利尼（Pellini）等人的观点来看，似乎认为 NDT 温度是属于开裂温度的，即结构低于该温度，开裂时不发生塑性变形；而高于该温度，要产生一定的塑性变形才开裂。但国外许多研究者如 F.M.Burdekin，J.J.Nibbering 则认为 NDT 是属于止裂温度范畴的，即高于该温度，材料具有止裂性能；低于它，材料不具备止裂性能。

我们可根据这种方法的试验程序和开裂、止裂温度的含义来具体分析一下 NDT 到底属于何种温度。

如上所述，凡是衡量裂纹产生前参数的，称为开裂型试验，例如 Wells 宽板拉伸试验，是确定试样断裂前产生0.5%塑性变形所对应的温度，因此该温度是开裂温度。反之，凡是以裂纹产生后的参量作为衡量指标的称为止裂型试验。对于落锤试验来说，它的引裂是依靠在试样上堆焊一道脆性焊道达到的，即该脆性焊道在试样内引起若干微裂纹作为引裂源。试验时，在一定温度下对试样进行冲击，产生脆性裂纹后，如果该裂纹没有扩展到试样端部，则认为试样未裂。继续冷却其他试样，从中找出一个温度，在此温度下冲击时裂纹扩展到试样一个端部，才算裂开。显然 NDT 不是衡量裂纹产生前的参数，而是出现脆性裂纹后，看其是否扩展到试样端部而定出的，也就是说，它是确定材料是否能将脆性裂纹止住的温度，显而易见，落锤试验是属于止裂试验范畴的。

在此也有必要对止裂温度的特性加以阐述。有人认为，在结构中如果工作温度高于该温度，裂纹将不能扩展，试验表明，这是一种片面的看法。带有原始裂纹的圆筒容器的爆破试验表明，如果在载荷系统内具有足够的能量，即使温度升高到 300℃，裂纹仍可在低应力状态下扩展，导致结构的破坏。

这充分说明，材料的止裂温度不是一个常数，它与结构的储存能量有关。严格说来，对于中低强度钢裂纹停止的温度是表示这样一个温度范围，即在此温度以下，裂纹以快速的、具有平断口的解理断裂来扩展，而高于该温度裂纹以扩展速度较慢的斜断口的剪切断裂来代替。因此，裂纹停止温度可更恰当地说成是断裂外形转变温度。

如何把落锤试验的结果，直接用于焊接结构的设计中去呢？众所周知，如果在焊接结构最薄弱环节，即焊接接头处产生一脆性裂纹，其扩展方向一般有二：一为沿焊缝方向扩展；二为从接头处进入基本金属。大量研究表明，对于中、低强度钢来说，由于焊接残余应力的作用除非在焊缝中具有大量未焊透的焊接缺陷，或在该方向上工作应力较高以外，裂纹一般是向基体金属方向扩展。此时材料的落锤试验数据是有用的，它表明当基本金属工作温度高于 NDT 温度时，它对焊接接头部位产生的小裂纹有一定止裂或减缓扩展速度的作用。但是如果材料强度较高，使得残余应力作用相对减弱；或虽然材料强度不高，但焊缝中具有严重未焊透缺陷或工作应力较高，此时焊接接头中的脆性裂纹完全有可能沿焊缝方向扩展，最后造成结构破坏。显然此时基本金属的止裂性能在防止结构的脆断上已显得无能为力了。从这一点出发，我国落锤试验标准中列入了焊接接头，包括焊缝的 NDT 测试内容，要求焊缝的止裂性能看来有一定道理。

但是，焊接接头落锤试验的 NDT 温度仅可作为参考（在美国的 ASTM E208－81 标准中没有焊接接头落锤内容，而在我国的落锤试验标准的附录 B 中提供了该项内容的参考件），这是因为落锤试验为止裂性试验，因而很难保证裂纹在单一的熔合区、热影响区和焊缝中扩展，因而其止裂性能一般为焊缝（熔合区、热影响区）与基体金属一起的混合数据。更重要的是焊接接头为非均质体，焊缝屈服点与基本金属屈服点相比有高匹配与低匹配之分。此时应当根据哪个部位强度来选择落锤能量呢？如果根据基本金属强度选择，其结果是基体金属表面在规定挠度值下发生屈服，而高匹配焊缝下表面此时达不到屈服。实践表明，它一般造成基体金属部位断开（虽然该处没有锯口）。只有在较低的温度下，焊缝才会开裂，因而得到偏低的 NDT 值。在所进行过的由 LB52NS 焊条施焊的 A131 钢焊缝和 A537 钢焊缝试验结果均说明了这个问题。如果根据高匹配的焊缝强度选择冲击能量，这不但是个困难的问题，而且整体试样势必发生深度屈服（NDT 的定义是试样下表面发生屈服时的断裂）。即此时 NDT 的概念发生了变化，因此说焊缝落锤试验尚值得进一步推敲。

同时在应用 NDT 数据时，还应注意到，虽然某些钢种的外形转变温度，或 NDT 温度高于大气自然温度，但由这些钢种制成的焊接结构仍在安全工作，并不破坏。其根本原因，可以说是它们的综合抗开裂性能好，脆性裂纹未“产生”之故。因此，人们采取的安全保护措施就是不要在结构中“产生”裂纹。只有在脆性裂纹“产生”以后，NDT 温度才是人们关心的防断参量。

目前，对落锤试验批评最多的地方是其引裂方法，因为在试样上堆焊脆性焊道时，对材料将起到一定热处理作用。这一点连落锤试验标准 ASTM 208－69 也予以承认，提出“由于堆焊会产生一定的热作用区，致使受热影响的材料比未受热影响的板材具有更大的抵抗断裂性能的反常现象”。

这里，因 P_1 试样尺寸较大，加热面与整个尺寸相比，其影响不大。此时所得到的 NDT 值，估计接近于基体金属的真正外形转变温度，即止裂温度。而对于 P_2 型试样，由于试样尺寸大大地小于 P_1 型试样，则堆焊焊道的相同热量作用在较小较薄的试样上，将起到比较均匀的热处理作用，它改善了材料的止裂性能，降低了材料的 NDT 值。这时的 NDT 值已不代表材料的真正的止裂性能了。因此，如果材料较薄，需用 P_2、P_3 或 P_4 型试样进行试验时，此时最好采用在轧制状态的有关试样上先堆焊好脆性引裂焊道，再去进行板材有关规范所要求的热处理，最后进行试验，这样方可得到较真实的试验结果。

（2）动态撕裂试验（DT 试验）

该试验是一种能够确定金属材料断裂韧度的全范围的试验方法，20 世纪 60 年代由美国海军研究所提出，1973 年列入美国军用标准，1980 年正式修正为美国材料试验协会标准，编号为 ASTM E604－80。我国也于 1985 年颁布了动态撕裂试验标准 GB5482－85“金属材料动态撕裂试验方法”。

试样的外形尺寸如表 9.1-6 和图 9.1-55 所示。按 GB 5482－85，厚度大于 16 mm 的材料应加工成 16 mm 厚试样；

小于 16 mm 板件取板材原厚，并保留原轧制表面。

表 9.1-6　动态撕裂试验试样尺寸

参　　数	尺寸	公差
长度 L/mm	180	±3
宽度 W/mm	40	±2
厚度 B/mm	16	±1
净宽度（$W-a$）/mm	28.5	±0.5
机加工缺口宽度 N_w/mm	1.6	±0.1
机加工缺口根部角度 N_a/（°）	60	±2
机加工缺口根部半径 N_r/mm	0.13	Max
压制尖端深度 t_D/mm	0.25	±0.13
压制尖端角度 t_a/°	40	±5
压制尖端根部半径 t_r/mm	0.025	—

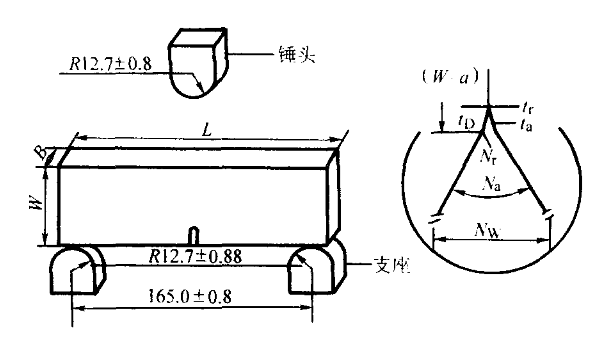


图 9.1-55　动态撕裂试样

早期试样启裂是由钛脆化的电子束焊缝来形成（这种焊缝在载荷作用下极易开裂，之后提供一个尖锐的深缺口），后来又采用疲劳方法制造这种深的尖锐缺口。现在一般采用 ASTM E604－80 标准规定的压入缺口作为启裂源。即首先在试样上开出一个 11.5 mm 长的机械缺口，然后再在该缺口尖端用特制刀片压出深为 0.25 mm 的缺口。刀片的尺寸和形状如图 9.1-56 所示。试样缺口顶端应逐个压制，压制力可按下式估算：

$$P = k\sigma_b B \qquad (9.1\text{-}37)$$

式中，k 为常数，取 1.8 ± 0.5；σ_b 为材料抗拉强度；B 为厚度。

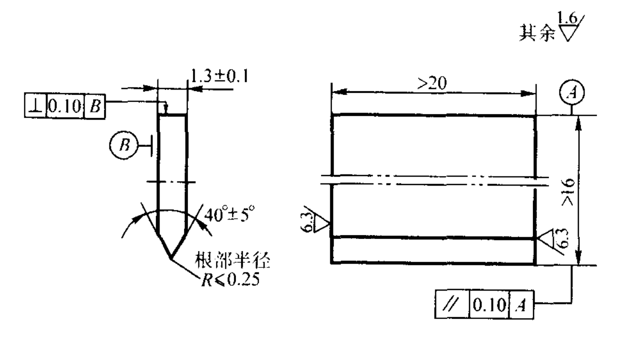


图 9.1-56　压制缺口尖端的刀片尺寸

在 ASTM E604 中没有焊接接头动态撕裂试验的内容，在我国的 GB 5482－85 标准内列入了焊接接头的动态撕裂试验内容，并对取样及缺口位置作了具体规定，如图 9.1-57 所示。

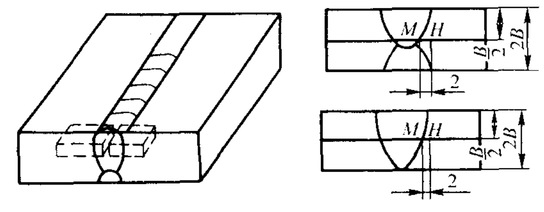


图 9.1-57　接头试样缺口位置

由图可见，焊缝试样缺口轴线应与焊缝表面垂直，并位于焊缝中心处；对于熔合区试样缺口要开在 1/2 厚度平面与熔合区交界 M 处；对过热区试样缺口开在与熔合区交界处之外 2 mm 的 H 处；而热影响区各部位缺口位置，可根据技术文件要求开在 M 点以外的任何部位。

试验可在大型摆锤式试验机上或落锤式试验机上于不同温度下进行。在测试过程中要记录如下参量。

1）动态撕裂能量 DTE　在摆锤试验机上可根据装置上的表盘读数读出，在落锤式试验机上 ASTM 曾规定测量铝块残余变形方法计算撕裂能，显然这种方法不够精确，最近在 ASTM 标准中已有了用光敏方法测定 DTE 的论述。

2）断口剪切面积的百分数　在 ASTM E604－80 和我国现行标准 GB5482－85 中 DTE 作为 DT 试验的唯一指标。但在 ASTM E604－83 中增加了断口剪切面积的百分数 S_a% 的指标。同时美国海军研究所研究结果表明，不能把 S_a% 作为 DTE 等效方法加以推广，即在某些情况下，用 S_a% 是可能的，但在另外一些情况下会造成误解。例如对某 $\sigma_s>640$ MPa 材料，DT 试验结果表明，其上平台能量低于 4 746 J。当能量曲线已达到上平台时，试样上仍留有平断口，这容易使人误认为它仍属于混合断裂，虽然根据能量曲线它已达到平面应力状态。

但是也有的研究认为，DTE 要受试样缺口尺寸、跨距、测试条件等因素的影响，而用断口形貌表征的转变温度范围在评定脆性断裂的止裂性能上是很好的参量。由于它是裂纹扩展的留印，因此它比 DTE 反映止裂性能更为准确（试验中总要有一部分 DTE 消耗在启裂功上）。

结合 A131 钢、A537 钢及 CF60 钢的 DT 试验，对下述内容进行了探讨，这对推广 DT 试验的应用，有一定指导意义。

1）DTE 和 S_a% 的测定　目前，DT 试验在我国尚未得到广泛应用，原因之一是国内仅有极少数单位拥有大型摆锤试验机可进行 DT 试验。显然，如能在我国广泛应用的落锤试验机上增加 DTE 测试功能，无疑为促进动态撕裂试验在我国的普及应用提供了一个有效的途径。光敏方法是测量 DTE 的简单易行的方法。

根据机械能量守恒定律，DTE 等于锤头初始接触试样与打断试样后的机械能量差和测点位置不同带来的差异，即

$$\mathrm{DTE} = E_1 - E_2 + E_0 = \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2 + E_0 \qquad (9.1\text{-}38)$$

式中，m 为锤头质量；v_1 为接触试样时的锤头速度；v_2 为打断试样时锤头速度；E_0 为测量 v_1 部位（锤头下部 A 点）和测量 v_2 部位（锤头上部 B 点）不同所具有的势能差。理论上 $E_0 = mgh_{AB}$。在实际情况下考虑摩擦等因素的影响，$E_0 = mah_{AB}$。（a 为锤头下落的加速度。）

E_0 可用如下方法标定：不放试样，让锤头自由下落，测定落锤在 AB 两点时的速度分别为 v_{10} 和 v_{20}，此时 DTE =



0。代入上式，则

$$0=\frac{1}{2}mv_{10}{}^{2}-\frac{1}{2}mv_{20}{}^{2}+E_0 \qquad (9.1\text{-}39)$$

$$E_0=\frac{1}{2}m\ (v_{20}{}^{2}-v_{10}{}^{2}) \qquad (9.1\text{-}40)$$

$$DTE=\frac{1}{2}mv_1^2-\frac{1}{2}mv_2^2+\frac{1}{2}m\ (v_{20}{}^{2}-v_{10}{}^{2}) \qquad (9.1\text{-}41)$$

根据此式，不难测出试验中的动态撕裂能DTE。

由于剪切面积断口形貌是反映裂纹扩展后的留印，因而可更好地反映材料在不同温度下由吸收能量少的快速断裂向扩展较慢的剪切断裂转变性能。目前常用的测试方法有：对断口直接目测估计；将不规则形状近似成规则形状用卡尺测量；对断口照像，并对照片上的断口进行分析。分析的方法又有：将照片上脆性部分和韧性部分剪下用天平测出各自的质量，求出相应的百分比；用面积仪测量，用图像分析仪对照片进行图像分析等。

上述方法中，有的精度不高，有的精度高，但方法太复杂不易进行。且有时尚需专门仪器。美国标准ASTM E604－83采用的方法是将不规则形状近似成规则形状，用卡尺测量。

2）DT试验结果举例　采油平台用钢A537的DT试验结果如图9.1-58a所示，CF－60钢及焊接接头的试验结果如9.1-58b所示。其中后者根据GB 5482－85的规定每个温度测试了两块试样。

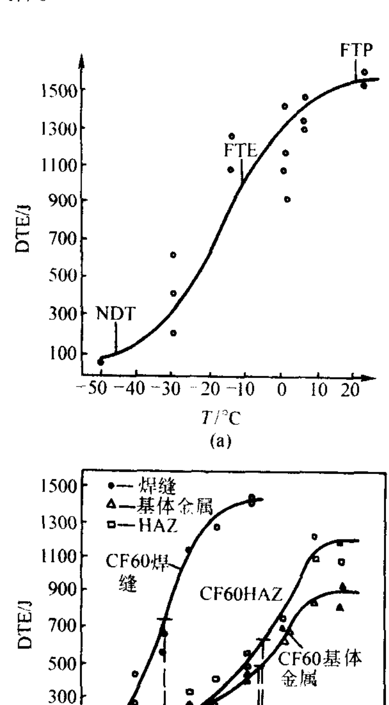


图9.1-58　DT试验结果举例

已有的研究表明，低碳钢和低合金钢的无塑性转变温度NDT对应于DT试验的DTE－T曲线的下趾部，这一点为试验研究所证实。根据作者们早期的对A537钢的试验结果，其NDT值为－45℃，它正好对应本研究的DTE－T曲线的下趾部。这一方面证实了本落锤试验机的可靠性，也说明了NDT这一特性的确实性。同时根据Pellini的研究FTE＝NDT＋33℃，FTP＝NDT＋66℃，从CF60钢的DTE－T曲线可见，它们分别大致位于该曲线的中点和上平台，这一点对结构防断设计是有重要意义的。即根据结构重要性的不同可分别取NDT、FTE、FTP作为其止裂温度的依据，当然如采用落锤试验这仅是三个特征点，但在DT试验基础上可以按DTE－T曲线全面考虑确立采用的材料止裂温度，因而更为合理。

另外，按GB 5482－85进行了焊缝和热影响区试验。由焊缝和基体金属的DTE－T曲线可知（见图9.1-58b），对于CF－60钢接头不但焊缝相应的DTE值高于基体金属，且其转变温度也显著地低于基体金属，这就说明焊缝的止裂性能优于基体金属。换句话说，在这种接头中裂纹沿焊缝扩展的可能性很小（除非具有非常严重的缺陷），因而基体金属的止裂性能是这种材质结构防断设计的主要着眼点。

值得提出的是由于热影响区非常窄小和受周围非均质材质的影响，启裂后断裂扩展路径一般不单在热影响区内，其止裂数据反映了基体金属、热影响区、焊缝的混合性能结果。这也反映了实际结构的情况，因此与抗开裂性能不同，在标准中规定测试热影响区止裂性能的提法是值得商榷的。

（3）落锤撕裂试验（DWTT）

落锤撕裂试验（Drop Weight Tearing Test）最早是由美国海军研究所的Puzak和Pellini提出的，美国“巴特尔纪念”研究所于1963年9月发表数据，证实落锤撕裂试验结果与管线服役性能之间有较好的相关性，即证明了落锤撕裂试验（DWTT）的断口形貌与管线和压力容器中的断裂扩展形貌相当一致，之后该方法在评定管道止裂性能中得到推广。

1974年该方法正式列为ASTM E436－74标准，并于1980年重新修订。同时美国石油学会也制定了相应的DWTT推荐方法（API RP5L3）。我国于1986年开始制定相关标准，并于1988年颁布GB 8363－87DWTT试验标准。目前落锤撕裂试验已被一些国家采用，特别是用于输送管道的板材质量检验中。

试样制备：试样尺寸为76 mm×305 mm×B。如图9.1-59所示。注意缺口为利用倾角为45°±2°的尖锐工具钢凿刀压制而成的0.2′±0.2″（≈5 mm±0.5 mm）深度的缺口（不能采用机械加工缺口）。

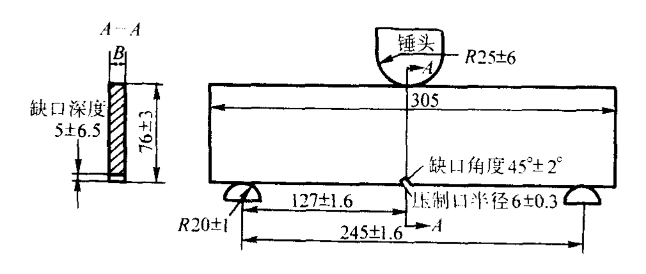


图9.1-59　落锤撕裂试样

试验可在摆锤试验机或落锤试验机上进行，保证打断试样需要具有一定的能量。

试验评定：剪切面积百分比是本标准方法标定的参量，应画出剪切面积百分比与温度的关系曲线。

可采用任何可行的方法，包括本章上节所提供的方法测试剪切面积百分比，但对于本试验国内外标准均提出了具体的测试方法。图9.1-60示出了典型的DWTT试验的断口表面形貌。

对于图中第一、第二两种情况即剪切面积在45%～100%时，可采用下式估算剪切面积百分值：



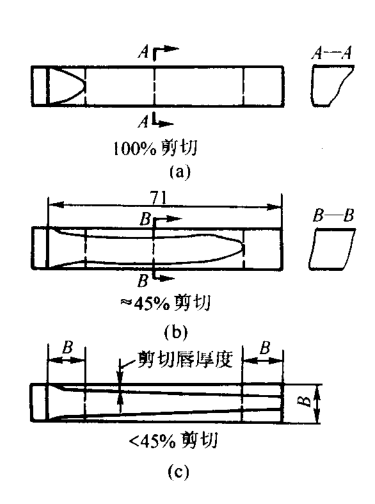


图 9.1-60 典型的 DWTT 断裂表面

$$S_a\% = \frac{(70-2B)\ B-0.75A\ \bar{B}}{(70-2B)\ B}\ (\%) \qquad (9.1\text{-}42)$$

式中，A 为距缺口一个厚度 B 处晶状断口的宽度；B 为距缺口 B 和无缺口端面 B 二者距离之间晶粒断口长度。

对于第三种情况即剪切面积小于 45%时，按照我国标准规定需测出扣去 $2B$ 之后中央处的总剪切唇厚度（即上下两个剪切唇之和），取其平均值，除以试样厚度并乘以 100%即为剪切面积的百分比值。

在美国石油学会输送管道落锤撕裂试验的推荐方法中，把板厚从美国 ASTM 的 20 mm 扩展到 40 mm，并规定当管道壁厚等于或小于 19 mm 时，试样厚度应为全厚度；当板厚大于 20 mm 时，可采用全板厚试样（此时计算剪切面积时，B 值仍取 20 mm），也可采用从一个表面或两个表面减薄厚度的试样（最薄可为 20 mm），但试验温度应比规定的试验温度低。具体的温度降低值如表 9.1-7 所示。

表 9.1-7 减薄试样的温度降低值

规定的管壁厚/mm	试验温度降低值/℃
19 ~ 22	12
22 ~ 28	7
28 ~ 30	1

试样可以在管子上直接切取，其长度应沿管子圆周方向。同时试样可以完全压平，或在试样中心 25 ~ 50 mm 处保持原有曲率，但采用不压平的试验结果更可取。

2.4 影响结构断裂的因素

2.4.1 应力集中对焊接结构脆性断裂的影响

焊接结构比铆接结构刚性大，所以焊接结构对应力集中因素特别敏感。美国“自由轮”发生的破坏事故，很能说明这个问题。以往，当这种形式的轮船采用铆接结构时，虽然应力集中很大，但并未发生过脆性破坏事故。在采用了焊接结构后，却发生了一系列脆性破坏事故。对这个问题进行了深入研究后发现，船体设计不合理形成多方位的应力集中是造成结构脆性破坏的重要原因之一。图 9.1-61a 所示为“自由轮”甲板舱口部位的原始设计方案，这是从铆接船只照搬下来的舱口设计，它便于制造，但不符合焊接结构的工作性能要求，因为尖锐的缺口形成高值的应力集中。叠板与舱口焊接后，在舱口尖角处形成高值的应力集中，同时叠板的平面端面也是应力集中点。再有，这样的设计也不符合自动焊工艺要求，因而只能采用手弧焊。实践表明，焊后有大量的未焊透缺陷又导致了工艺因素的应力集中。其结果是结构的承载能力不高，与实际结构形式和尺寸相同的试样试验表明，这种舱口的承载能力仅为 680 t（6 800 kN），而破坏时的能量吸收值为 25 870 J。

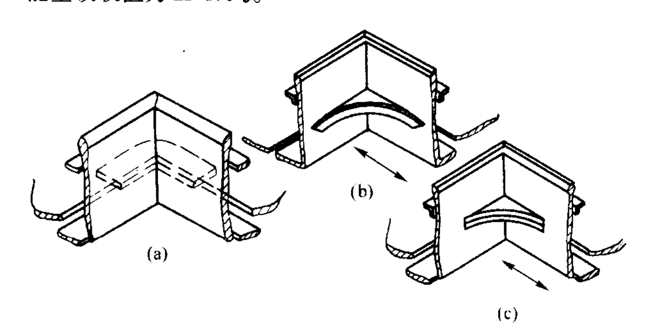


图 9.1-61 自由轮的舱口设计

图 9.1-61b、c 是对原始舱口设计的两种改进方案。如图所示，方案 b 是在舱口拐角处补加了一块托板，造成了舱口角的圆形过渡；方案 c 是在舱口板上预先开出缝隙，以便甲板穿过。同时将穿出的甲板制成圆弧形状，并焊上一块与甲板形状相同的叠板。这两种改进方案均减缓了舱口的应力集中情况，提高了承载能力和破坏时的能量吸收值，见表 9.1-8。

表 9.1-8 不同舱口的服役和实验数据的比较

试样号	形式	图号	服役记录			试验室数据①	
			服役/船·年	断裂的数据	断裂数 10 船·年	断裂时吸收功/J	断裂时的最大正应力/MPa
5	原始设计，舱口方形，尖角，局部穿透型焊缝	9.1-61a	2 110	224	10.6	300 000	153
32	原始设计，采用穿透型焊缝	—	—	—	—	1 030 000 ~ 1 150 000	185 ~ 191
28	原始设计，舱口尖角处装有圆形托板	9.1-61b	4 400	31	0.7	1 197 300	201
30	原始设计，舱口处为圆弧形甲板	9.1-61c	3 750	1	0.03	4 715 100	227
34	胜利轮型	9.1-62a	2 100	0	0	7 540 000	212
	肯尼迪型	9.1-62b	—	—	—	8 821 800	345②

① 为了便于制造和进行试验，试验的试样与实体结构稍有不同。
② 在随机的焊接缺陷处（引弧处）发生失效。



在随后美国建造的自由轮上，对舱口设计进行了进一步的改进，应力集中系数进一步降低，使其更适应焊接结构的工作性能。同时焊接工艺操作条件也得到了改善，试验表明它断裂时的承载能力提高到910 t（9 100 kN），同时破坏时的吸收能量达到660 502 J，它比自由轮的原始设计断裂吸收能提高20余倍，见表9.1-8。

最成功的舱口设计方案称为肯尼迪（Kennedy）舱口设计，如图9.1-62b所示。实物试验表明断裂的起始点在焊接的起弧处，而不是在舱口处，其缺点是制造和随后的修理工作较为复杂，见表9.1-8。

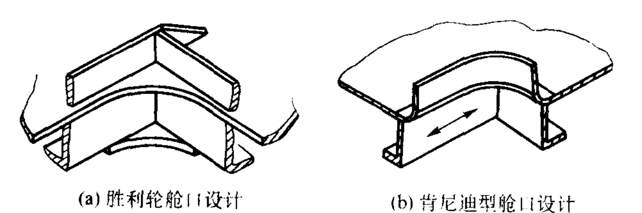


图9.1-62　合理的船舶舱口设计

上述舱口设计实例充分说明了应力集中因素对焊接结构脆性破坏影响。应当注意的是，并不是在所有情况下应力集中都影响断裂强度。当材料具有足够的塑性时，应力集中对结构的延性断裂并无不利影响。例如侧面搭接接头在加载时，如果母材和焊缝金属都有较好的塑性，起初焊缝在弹性极限内工作，其切应力的分布是不均匀的，如图9.1-63所示。继续加载，焊缝的两端端部由于应力集中影响首先达到屈服点（τ_s），则该处应力停止上升，而焊缝中段各点的应力因尚未达到屈服点，故应力随加载继续上升，而达到屈服点的区域逐渐加大，应力分布曲线变平，最后各点都达到τ_s。如再加载，就会使焊缝全长达到材料强度极限最后破坏。这说明，只要接头材料具有足够的塑性，加载过程中可发生应力均匀化现象，则应力集中对结构的断裂强度就不产生影响。

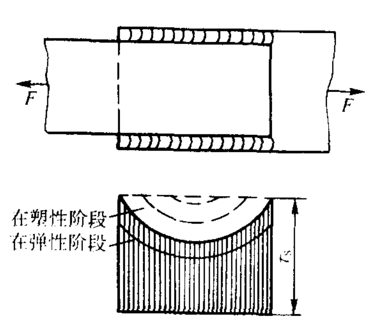


图9.1-63　侧面搭接接头的工作应力均匀化

2.4.2　焊接残余应力对结构性能影响

日本Kihara通过大板拉伸试验，研究和揭示了焊接残余应力对焊接脆性破坏的影响，得出了非常有价值的结论。即在材料的开裂转变温度以下，焊接残余应力具有不利的影响，与工作应力叠加，可以形成结构的低应力脆性破坏；而在转变温度以上，焊接残余应力对脆性破坏无不利影响。

在断裂力学应用于焊接结构研究中，为了无误地确立K_I的表达式，必须正确地考虑两个因素：一是由于加热和冷却的不均匀性或相变所产生的残余应力，二是焊接接头中几何形状变化产生的应力集中。

对于残余应力的处理，目前有两种方法。一是将残余应力σ_R叠加到施加应力σ_a上，然后据此计算K_I值，英国标准和国际焊接学会有关标准建议采用此法，并简单地假定$\sigma_R=\sigma_S$（屈服点）。日本和我国有关标准也建议采用此种方法，但认为$\sigma_R=0.6\sigma_S$。另一种方法是分别计算σ_R和σ_S引起的K_R和K_a；然后再将K_R和K_a叠加成K_I。Wells计算了中心贯穿裂纹板的K_R和K_a：

$$K_a=\sigma\left[W\tan\left(\frac{\pi a}{B}\right)\right]^{1/2}\qquad(9.1\text{-}43)$$

$$K_R=2\left(\frac{a}{\pi}\right)^2\int_0^a\frac{\sigma_R\,dx}{\sqrt{a^2-x^2}}\qquad(9.1\text{-}44)$$

式中，B为板厚；σ_R为裂纹形成前的残余应力；a为裂纹长度的一半。

图9.1-64示出了所推荐的K_I示例。可见残余应力引起的应力强度因子值具有局部性特点，远离焊缝后其值急剧降低。而施加应力所引起的应力强度因子值随裂纹长度的增长而增大，综合结果在板件中造成趋于平均分布的K_I值。

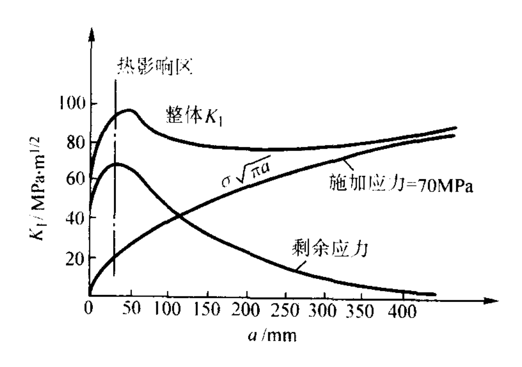


图9.1-64　应力强度因子K_I的分解

应当指出，在弹性范围内，将K_R和K_a简单叠加成K_I是无误的。但是当σ_R和σ_a两种应力发生塑性效应时，就不能再通过由两个独立应力系统各自产生的K_a和K_R简单的线性叠加来解决，需要进行修正。在一些研究中，该修正值用ρ表示，该ρ值随施加载荷与塑性流动载荷的比值来变化。如图9.1-65所示，图中σ^P（σ_a）应力和σ^S（σ_R）应力的大小用相应的参考应力（即由真应力－应变关系上测定的应力）来表示。

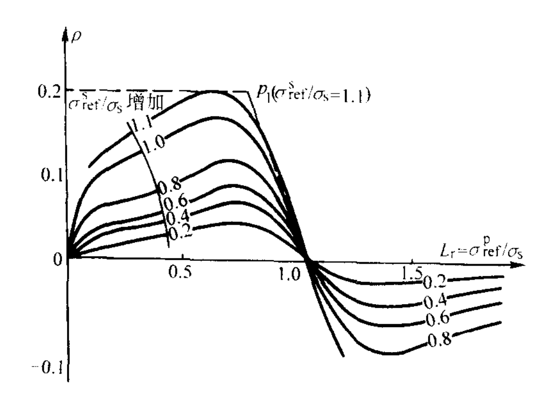


图9.1-65　ρ与σ^S应力和σ^P应力大小的关系

由图9.1-65可知，在净截面屈服后，此修正值变为负值，这显然是有利的。但是一些标准为了稳妥起见，不考虑这一有利的效果，而是用图9.1-65所示的方法将其理想化，即

ρ＝常数（ρ_1）　　对于$L_r=\dfrac{\sigma^P_{ref}}{\sigma_s}\leqslant 0.8$

ρ_1见图9.1-79

ρ＝线性下降　　对于$0.8<L_r\leqslant 1.05$

$\rho=0$　　对于$L_r\geqslant 1.05$

在弹塑性状态下，这是一个颇为复杂的问题，现仍是一个值得探讨的热点课题。

2.4.3　焊接接头非均质性对断裂行为的影响

在焊接结构设计中，首先遇到的问题之一是确定焊缝金属强度，即焊缝金属强度匹配问题。对此目前存在着两种不同观点，其一是保证焊缝金属常规延性、韧性条件下，例如使焊缝金属与基体金属具有相同的伸长率条件下，适当选用屈服点较高的焊缝金属，即高匹配是有利的；其二是把着眼点集中于焊缝的韧性或延性上，而其强度与基本金属相比可适当降低，即低匹配。有鉴于此，对匹配问题进行了较为广泛的研究。

在焊缝强度匹配影响的圆桌讨论会上的总结中，Burdekin等人提出：在垂直拉伸载荷下的对接焊接接头中，对于高匹配焊缝金属，可降低焊缝金属的韧性要求值。相反低匹配焊缝金属具有潜在的金属断裂影响，因而需要高于母材的韧性值。这是因为在高匹配接头中，在母材发生应变硬化以前，在焊接金属中不会发生屈服流动。相反，在低匹配焊缝金属中，在母材发生很小变形情况下，在焊缝宽度范围内已发生屈服流动，并发生塑性变形之故。

该总结指出，横向对接焊缝中面型缺陷影响的大小将依赖于构件整体尺寸。例如，对于焊缝中心处的贯穿厚度裂纹其屈服流动性将依赖于裂纹长度与焊缝宽度的比值和裂纹长度与板宽的比值。研究表明，当上述比值小于一定值的话，高匹配焊缝中的裂纹将在不会发生焊缝韧带屈服情况下母材产生屈服，这可称作焊缝中的裂纹受到了母材的保护。

滑移线场分析证实了裂纹受母材保护的条件为：

$$a/h < 1.4\left(\frac{\sigma_{SM}}{\sigma_{SP}} - 1\right) \qquad (9.1\text{-}45)$$

式中，h 为焊缝宽度；σ_{SM} 为焊缝屈服强度；σ_{SP} 为母材屈服强度。

作为一例由该式可见，当焊缝金属屈服强度比母材金属高出30%时，裂纹长度与焊缝宽度之比为0.42时，焊缝就不发生屈服而直接导致母材屈服。

对于低匹配焊缝，在焊缝上一般都要发生韧带屈服，其值与焊缝宽度与板厚比有关。

焊缝强度匹配对角焊缝的断裂性能影响研究较少。这是因为在角焊缝中实际应力状态十分复杂，为此在设计中作了大量假设。通常因为角焊缝中承受着高值的剪切应力，焊缝设计强度要大大低于对应的相同屈服强度的母材强度。另外，对角焊缝中的断裂韧性值研究较少。应当说目前多认定角焊缝的失效受屈服强度、抗拉强度支配和只有通过断裂路径来研究焊缝金属匹配影响。高匹配的横向角焊缝的益处表现为在超大断裂载荷作用下断裂不发生在围绕焊缝金属的母材路径上。而横向低匹配角焊缝的强度，需建立在焊缝金属强度上，并要说明，这样的角焊缝不可能产生较大的变形，因而是不利的。

2.4.4　结构制造中的应变时效对结构断裂性能影响

钢材经过冷加工产生一定的塑性变形，例如在焊接结构生产过程中的剪切、冷作矫形、弯曲，随后又经过150～450℃温度范围的加热，就会引起应变时效。另外，焊接时金属受到热循环作用，如果这时在待焊焊缝附近存有某些尖锐刻槽或在多层焊道中已焊完焊道中存有缺陷的话，在焊接过程中又将在缺陷处产生焊接应力－应变集中，发生一定的塑性变形。热循环和塑性变形同时作用也会引起应变时效，一般称此时的应变时效为热应变时效或动应变时效。

研究表明，对许多低中强度钢来说，应变时效引起的局部脆化是非常严重的。它大大提高了材料的韧－脆转变温度，使材料的缺口韧性和断裂韧度值下降。

可采用冲击试验或拉伸试验研究钢材或焊接接头的应变时效脆化性质。我国国标，例如GB/T 2655—1989“焊接接头冷作时效敏感性试验法”规定采用冲击试验进行。

作为示例，简要介绍国内对CF－60钢板材和焊接接头的应变时效冲击试验要点是有益的。表9.1-9和表9.1-10分别示出了CF60钢及其焊缝的熔敷金属的力学性能。

表9.1-9　WCF－60钢的力学性能

σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ/%	A_{KV}（40℃）/J	冷弯 $d=2a$，180℃
568	637	22	74.5，108.0，126.5	良好

表9.1-10　熔敷金属力学性能

焊条直径 /mm	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	ϕ /%	a_{kv}/J·cm^{-2}	
					室温	－40℃
4	542	630	24.00	73.75	237.65，231.1，250	180，150，152

试样时效处理时首先把宽110 mm长500 mm的板材试板或焊接接头试板在1 000 kN拉力试验机上进行拉伸，并按国标使试板在240 mm标距内产生5%的残余变形。对焊接接头试样，加载轴线要与焊缝轴线平行。拉伸后的试板再加热至250℃，保温1 h后随炉冷却。

焊接接头冲击试验在试板上沿垂直于焊缝方向上切取，如图9.1-66所示。然后按标准加工成夏比V形缺口冲击试样。焊缝金属试样的缺口轴线垂直于焊缝表面，热影响区试样的缺口轴线平行于焊缝表面，开缺口前试样要经过侵蚀，清晰显示焊缝轮廓，按缺口所在位置划线加工。

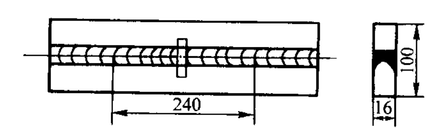
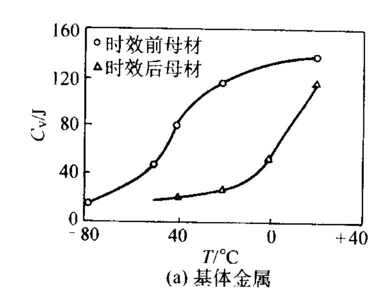


图9.1-66　冲击试样的切取

CF－60钢板材及焊接接头的应变时效前后冲击试验结果，即破断冲击吸收功与温度的关系曲线如图9.1-67所示。另外根据GB/T 2655—1989计算了接头各部位在不同温度下的时效敏感性 C，见表9.1-11。



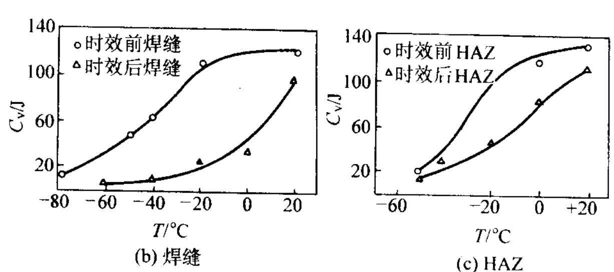


图9.1-67　CF－60钢的应变时效冲击试验结果

表 9.1-11　CF－60 钢基体金属及焊接接头应变时效的敏感性

试验部位	不同温度下应变时效敏感性 C/%			
	20℃	－20℃	－40℃	－50℃
板材	23.44	74.21	72.24	54.79
焊缝	21.68	74.06	84.54	85.81
热影响区	14.62	80.29	16.73	40.91

由试验结果可见：CF－60 钢基体金属、焊缝和热影响区各部位经过应变时效处理后的试样断裂冲击吸收功均低于应变时效前的试样破断冲击吸收功；时效前或时效后的 CF－60 钢焊接接头各部位的断裂冲击吸收功或冲击韧度值在相同温度下基体金属最高，焊缝次之，热影响区最差。

由图 9.1-67 可见，CF－60 钢焊接接头各部位应变时效前后的断裂吸收功或冲击韧度值在曲线陡降段部分相差较大，而在上、下平台部分相差较小，即在韧－脆转变温度区间内应变时效对冲击韧度值的影响更甚。

比较热（动）应变时效和冷作硬化引起的应变时效对脆性的影响表明，对一些钢种特别是沸腾钢、半镇静钢来说，热应变时效的影响更为严重。图 9.1-68 示出了这方面的研究成果。试验是用 4 组 10 mm^2 的方形截面缺口试样进行的，试样材料为 C－Mn 钢，其主要化学成分为 C = 0.14%、Mn = 1.15%、Si = 1.14%。屈服点为 263 MPa，抗拉强度为 450 MPa。第一组在 +20℃ 下预弯，随后在 250℃ 下时效 0.5 h（模拟加工硬化的应变时效）其他三组试样分别在 150℃、250℃和 350℃下预弯（模拟热应变时效）。所有试验的预弯处理，均是先使缺口张开约 0.15 mm，然后向里弯曲到原来尺寸。经过这样处理的试样，在不同温度下进行 COD 试验，测出其断裂前的 COD 值。图 9.1-68 清楚地表明，不同温度下的预弯处理得出不同的 COD 温度转变曲线，且以冷弯变形的试样（20℃预弯）的转变温度值最低，250℃预弯的试样转变温度值最高。因此对某些待用钢材要考虑其动应变时效效应。

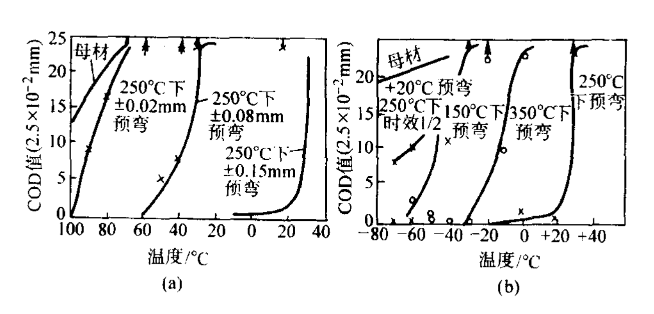


图 9.1-68　不同类型应变时效的结果比较

2.4.5　焊接缺陷对断裂行为的影响

在焊接接头中，焊缝和热影响区是最容易产生各种缺陷的地方，据美国对第二次世界大战中船舶脆断事故的调查表明，40%的脆断事故是从焊缝缺陷处引发的。

但是在某些情况下，缺陷的存在对结构的断裂行为却无不利影响。例如曾任英国焊接研究所所长之职的 Edgar Fuchs 通过大量试验证明：在铝合金焊接接头中，纵然有大量的气孔，对该接头的强度无任何不利影响，而返修却会造成结构或接头使用性能的降低。基于这一研究，英国焊接研究所首先提出了“合于使用”的概念。在断裂力学出现和广泛应用后，这一概念更受到了人们的注意与重视，成为焊接结构长期研究的中心课题之一。有关内容将在下节做详细介绍。

3　基于“合于使用”原则的断裂评定

3.1　“合于使用”原则及其发展

“合于使用”原则是针对“完美无缺”原则而言的。在焊接结构的发展初期，要求结构在制造和使用过程中均不能有任何缺陷存在，即结构应完美无缺，否则就要返修或报废；英国焊接研究所首先提出了“合于使用”的概念。在断裂力学出现和广泛应用后，这一概念更受到了人们的注意与重视，成为焊接结构长期研究的中心课题之一。现已逐渐发展成为原则，内容也逐渐得到充实，并且有了明确的定义。

目前“合于使用”这一原则或手段与“完整结构”在概念上的区别是它明确地承认焊接结构具有存在构件形状、材料性能偏差和缺陷的可能性，但是在建立于诸如应力分析、断裂力学、材料试验、质量检查、无损探伤等科学方法研究的基础上，“合于使用”原则要客观地保证结构不发生任何已知机制的失效事故，因此该原则为焊接结构设计、制造和操作提供了一个有效的手段。显然这一原则的基础是理论分析和试验测试的科学方法，它取代了“完美无缺”的经验性方法。换句话说，“合于使用”原则对设计、制造人员的要求更高了，而不是像片面误解的那样，认为“合于使用”原则是对结构的质量降低了要求。

“合于使用”原则可应用于不同目的，如用来在设计阶段确定构件尺寸的允许偏差和缺陷的允许值；用来确定在给定尺寸偏差和缺陷尺寸下的设计应力、所需的材料性能、构件缺陷验收标准等。

目前在一些国家中已建立了使用于焊接结构设计、制造和验收的“合于使用”原则的标准，甚至在一个国家内出现几种上述标准，它们的具体应用范围如下。

在制造过程中结构中出现了缺陷，根据”合于使用”原则确定该结构是否可以验收，应当强调的是允许一定缺陷的存在，与由于对焊缝进行局部修理而造成的更大冶金损伤、高值残余拉伸应力等因素相比，往往更为可取；在结构使用过程中，评定所发现的缺陷，是否可允许其存在；在设计新的焊接结构时，规定了缺陷验收的标准。具体地讲，它局限于下述情况：即评定新产品，或虽为老型产品但在新的条件应用时的相关常用质量控制验收标准；评定新材料和新焊接方法、工艺的适用性；确定工况检查准则和对其评定；开发焊接结构的验收规范。

因此可以说，“合于使用”原则，在一些国家内，至少已成为焊接结构设计、制造、验收相关标准的补充。

在“合于使用”评定标准中，无例外地均需要输入载荷、类裂纹缺陷和断裂韧度三个参量。虽然不同标准在处理方法上有些差异，但总体思路上差别不大，现以 IIW/IIS－SST－1157－90 标准为例予以介绍。

（1）应力参量

一些标准和 IIW－SST－1157－90 文件将应力分成几种分量，如表 9.1-12 所示。

表 9.1-12　应力成分

应力分类	应力类型	
	薄膜应力	弯曲应力
基本应力	P_m	P_b
二次应力	Q_m	Q_b
峰值应力	F	F_b



1）基本应力 它们包括薄膜应力分量和弯曲应力分量（P_m，P_b），P_m 为均布应力分量，等于截面厚度上应力的平均值，它们必须满足外载和内力及力矩的基本平衡定律；P_b 为由外加载荷引起的沿截面厚度变化的应力分量，P_m、P_b 均为设计应力。宏观的应力集中，如角变形引起的应力集中，将增大该项压力。

2）二次应力 这是由结构构件中变形约束或边界条件引起的薄膜应力和弯曲应力（Q_m、Q_b）。由局部塑性变形引起的残余应力、焊接残余应力和热应力均属于此项应力。所有这些应力的共同特点是它们在一个横截面上保持平衡，其数值受产品的热处理和加载经历影响。

3）峰值应力 这是指构件局部形状不连续性所引起的应力 F。例如腹板上的孔穴、法兰上的槽孔、容器的接管部位、对接接头的厚度变化所引起的应力集中等都属于这类应力。峰值应力数值的计算，往往要求运用复杂的应力分析方法，如有限元方法等。

（2）缺陷

1）分类 不完整性（Imperfections）和冶金不均匀性两种情况可导致焊接接头的偏误（Deviations）。其中不完整性又包括下述两种含义：即不连续性和几何形状偏差。

不连续性包括：裂纹、气孔、夹渣、未熔合等。在服役过程中同样会产生不连续性缺陷，如疲劳裂纹、腐蚀裂纹等。在一些标准中又把不连续性缺陷分为平面不连续性和体积不连续性。此时裂纹、未熔合、未焊透和其他类型裂纹缺陷属于平面不连续性缺陷；气孔、夹渣和类似的缺陷属于体积不连续性缺陷。应当说明，有时缺陷类型是难以区分的，如在某些情况下咬肉可视为简单的应力集中，而在某些情况下又应视为类裂纹缺陷。尤其是在咬肉根部出现微观裂纹时，咬肉应归类于裂纹缺陷。再例如一定类型的夹渣、气孔（特别是线性气孔）与未熔合有关时，此时则应将其视为类裂纹缺陷。

几何形状偏差包括轴向错边、角变形等，如上所述，这些尺寸偏差可导致接头应力集中。

2）缺陷的处理方法 在不同的标准中，平面缺陷均将包络它的矩形的高度予以理想化，并以此作为合于使用原则安全评定的缺陷尺寸。对表面缺陷其尺寸为 a（高度）和 $2c$（长度），对埋藏缺陷其尺寸为 $2a$ 和 $2c$；而对贯穿缺陷为 $2c$（在许多场合也标以 $2a$），为了进行应力强度因子计算，表面缺陷和埋藏缺陷均分别假定为半椭圆形裂纹和椭圆形埋藏裂纹。研究表明，对于贯穿缺陷，缺陷长度尺寸起主要影响；而对于表面缺陷和埋藏缺陷，高度尺寸起主要影响。具体的情况见图 9.1-69。

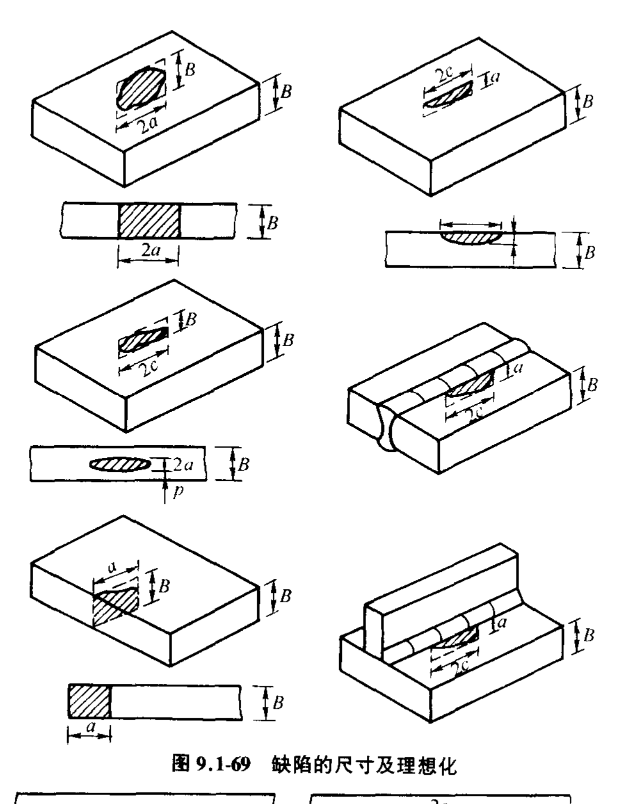


图 9.1-69 缺陷的尺寸及理想化

由于同一截面上的多个缺陷会产生相互作用，而导致比单一缺陷更为严重的影响，因此应对其进行复合，然后不再考虑它们间的相互影响。现存的不同标准采用的复合方法不尽相同，IIW/IIS-SST-1157-90 提出的复合方法如图 9.1-70 和图 9.1-71 所示。该复合方法的理论基础是：经过如此处理后其应力强度因子值增加 20% 以上，以上两图示出了复合后的单一缺陷的高度和长度。应当注意的是，复合后如果试样韧带部分在应力作用下可发生屈服的话，则应进行重新归类。即把埋藏裂纹处理成具有相同长度的表面裂纹，或把表面裂纹处理成为具有相同长度的贯穿裂纹。

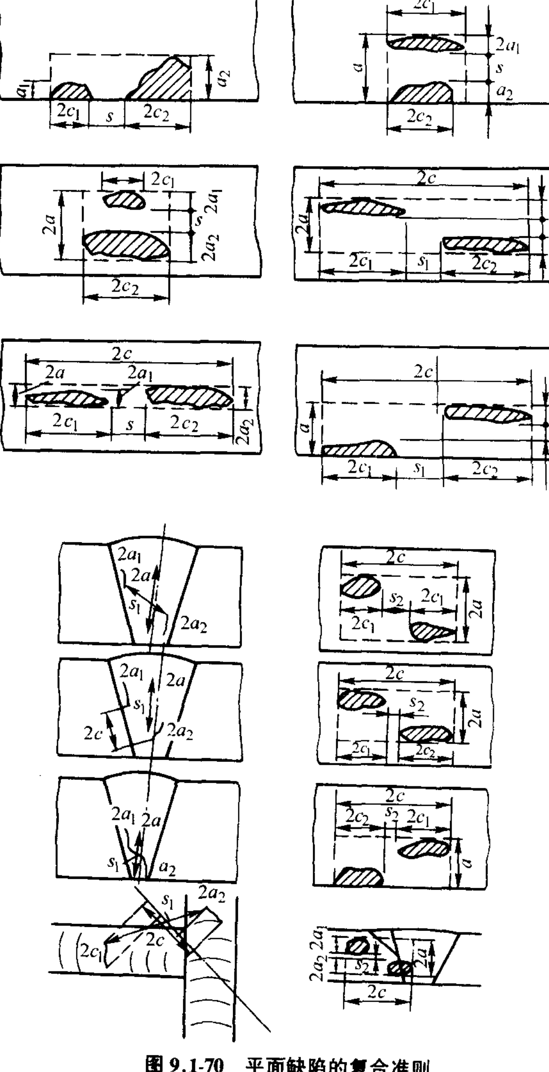


图 9.1-70 平面缺陷的复合准则

在采用以断裂力学为基础的合于使用原则安全评定中，其思路往往是根据缺陷的性质、形状、部位和尺寸将其换算成当量的（或称等效的）贯穿裂纹尺寸 $\bar{a}$。一般把实际贯穿缺陷的半长定为当量尺寸 $\bar{a}$，表面缺陷和埋藏缺陷的换算方法可按图 9.1-72、图 9.1-73 进行。然后将其与按一定程序（本节下面将详细论述）求出的允许裂纹尺寸 $\bar{a}_m$ 相比较，来决定所存在的缺陷是否可以验收。

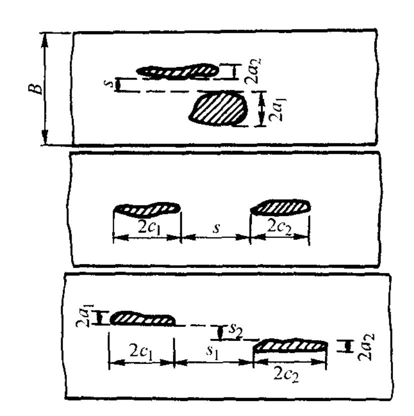


图 9.1-71　体积缺陷的复合准则

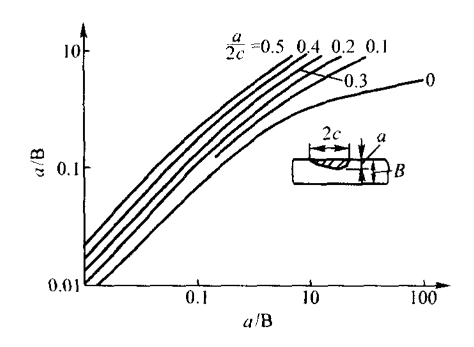


图 9.1-72　表面缺陷尺寸和 $\bar{a}$ 参量的关系

(3) 断裂韧度

一些基于"合于使用"原则的标准是以断裂力学为基础的，即把断裂驱动力与断裂抗力相比较，依此定出构件验收条件。缺陷尺寸、应力是断裂驱动力的主要组成部分，而断裂抗力则一般以不同的材料断裂韧度来表示。表 9.1-13 示出了几种标准的断裂驱动力参量即断裂韧度参量。

在某些情况下，当测量上述韧度值即 K_{IC}、δ_C、J_R 有困难时，一些研究者建议采用夏比 V 形缺口冲击试验值代替相关的韧度值。到目前为止，虽然在夏比 V 形缺口冲击试验结果与断裂韧度参量之间已建立了若干种关系式，但它们

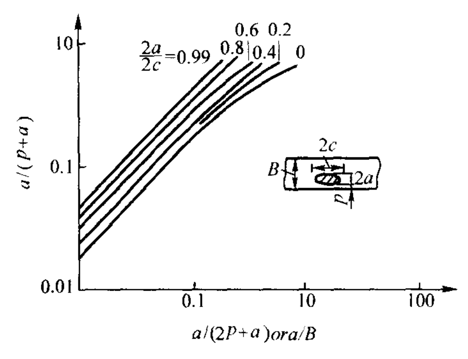


图 9.1-73　埋藏缺陷尺寸和 $\bar{a}$ 参量的关系

均属于经验公式，因而只限于对所研究的钢种适用。换句话说，对于其他不同材料和制造工艺，有关的关系式未必适用。这是因为不同材料、不同工艺对诸如应变速率敏感性，三轴应力数值，焊接影响有不同的效应所致。这说明，对于要求精确评定的场合，不能以夏比试验冲击吸收功代替断裂力学试验结果进行安全评定。

目前常用关系式为：

$$K_{IC} = AC_V^W$$

据此 Barsom 和 Rolfe 提出一个应用很广泛的关系式：

$$\frac{K_{IC}^2}{E} = 0.221\,C_V^{1.5}$$

式中，K_{IC} 为断裂韧度，$MPa \cdot mm^{1/2}$；C_V 为夏比 V 形缺口冲击能量，J；E 为弹性模量，MPa。

3.2　面型缺陷的评定

本节将介绍国际上最有影响的面型缺陷评定方法。

3.2.1　CEGB 的评定程序 – R/H/R6 – ReV1 – 3 有缺陷结构完整性的评定

$$K_r,\ \delta_r^{1/2} 或 J_r^{1/2} = S_r\left[\frac{8}{\pi^2}\ln\sec\left(\frac{\pi}{2}\times S_r\right)\right]^{-1/2} \tag{9.1-46}$$

在 1977 年提出的缺陷评定程序中，其要点是以方程 (9.1-46) 表达的，以图 9.1-74 为基础作为评定曲线，而这一简单模型的评定线是 $K_r=1$，$S_r=0$ 和 $K_r=0$，$S_r=1$ 之间

表 9.1-13　几种方法的断裂参量

标　准	参量与概念		评定范围	失　效	
	驱动力	韧度		避免失效	预测失效
ASME 第Ⅲ和第 XI 卷	K_I	K_{IC}	LEFM (LL)	×	
KTA 德国核安全评定标准	K_I	K_{IC}	LEFM	×	
PD – 6493	K_I，δ_I	K_{IC}，δ_C	LEFM + EPFM + LL	×	
WES – 2805	δ_I	δ_C	EPFM	×	
CEGB R6	K_r，L_r	K_{IC}，J_R	LEFM + EPFM + LL	×	×
R 曲线	J_C，δ_R，T	J_R，δ_R，T_{mat}	EPFM		×
EPRI	J_I	J_R	EPFM		×
DVS 2401 德国标准	K_I，J_I，δ_I	K_{IC}，J_R，δ_C	LEFM + EPFM + LL	×	×
RCC – M 法国标准	K_I，δ_I，J_I	K_{IC}，J_R	LEFM + EPFM + LL	×	
DVN 挪威标准	K_I，δ_I，J_I	K_{IC}，δ_C，J_R	LEFM + EPFM + LL	×	
Dntch	K_I，J_I	K_{IC}，J_R	LEFM + EPFM + LL	×	
裂纹止裂	K_I	K_{Ia}	动态 LPFM	×	×

注：LEFM—线弹性断裂力学；EPFM—弹塑性断裂力学；LL—极限载荷。

的光滑曲线。在纵坐标上（$K_r=1$，$S_r=0$）表示为当 $K_1=K_{mat}$（$K_{mat}=K_{IC}$），受控于线弹性断裂力学的失效，而横坐标上 $K_r=0$，$S_r=1$ 表示为延性失效。因此该光滑曲线表示为断裂和延性失效之间的插入值。图上的剖线面积表示屈服流动对断裂驱动力增加的影响。换句话说，在任意 S_r 值时的横坐标至评定线的高度为裂纹驱动力的弹性值，而其对应的剖线面积高度表达了到达失效状态时塑性流动的作用，应予以扣除。这说明在使用该失效评定图时，J 和 δ 均为施加驱动力的弹性部分，而塑性流动的影响已由失效评定图本身的曲线形状作了考虑（即从失效值中扣去了塑性流动的影响部分，施加应力越大，所扣除的塑性流动影响部分越多）。图中 K_r 值和 S_r 值为：

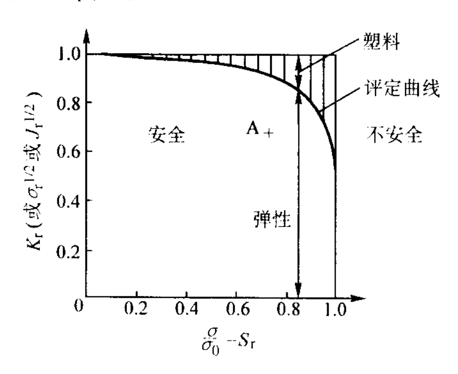


图 9.1-74　考虑延性失效的评定图

$$K_r=\frac{K_1}{K_{IC}};\quad S_r=\frac{P\ (\sigma)}{P_0\ (\sigma)}$$

式中，P 为被评定结构载荷的施加载荷（或应力 σ），P_0 为有缺陷结构塑性极限载荷（或应力 σ_0），可以采用不同的分析方法计算。但应保证它可适用于加工硬化材料，采用对应于流变应力 $\bar{\sigma}$（σ_{fs}）的载荷代替屈服应力时的载荷即可达到这一目的。

将按上两式计算出来的 K_r 值和 S_r 值放置在失效评定图 9.1-74 上，如果该点落在由坐标轴线与失效线［按式（9.1-46）建立］包围的区域内，则结构是安全的，可允许相关的缺陷存在；如果该计算值落在由坐标轴线与失效线包围的区域之外，则结构是不安全的。

自 1976 年发表了“带缺陷结构的完整性评定的 R/H/R6 一报告以来，1977 年进行了第一次修定，简称为 R6 方法，即上述方法。1980 年进行了第二次修订（R6 - Rev2），1986 年进行了第三次修订（R6 - Rev3）。在 1986 年这次修订中作了重大变动。主要是考虑了材料应变硬化效应，在建立缺陷评定评定曲线时，提出了三种选择和为适应于工程需要，提出了缺陷评定的三种类型分析方法；同时对裂纹延性稳态扩展的处理方法有了重大改进。

图 9.1-75 是新版 R6 失效评定曲线的一般形式。图中垂线 $L_r=L_{r\max}$（$L_{r\max}=\bar{\sigma}/\sigma_S$），说明结构塑性失稳载荷将受材料流变应力 $\bar{\sigma}$ 的控制，在一般情况下可取 $\bar{\sigma}=1/2\ (\sigma_s+\sigma_b)$，即流变应力为材料的屈服点和抗拉强度的平均值。显然 L_{max} 将大于 1，且随材料的不同而不同。为了精确建立该评定曲线，新版 R6 提供了三种选择（Option）。

选择 1：该方法最为简单，只要知道材料的屈服点和抗拉强度，而不具有材料的应力 - 应变关系数据时，可以采用这一选择。该选择的评定曲线可用下式表示，并可绘成图 9.1-76 曲线。其横坐标值由 L_r 代替 S_r。

$$K_r=(1-0.14L_r^2)(0.3+0.7\exp(-0.65L_r^6))\quad 对于\ L_r\leqslant L_{max}\qquad (9.1\text{-}47)$$

$$K_r=0\qquad 对于\ L_r>L_{max}$$

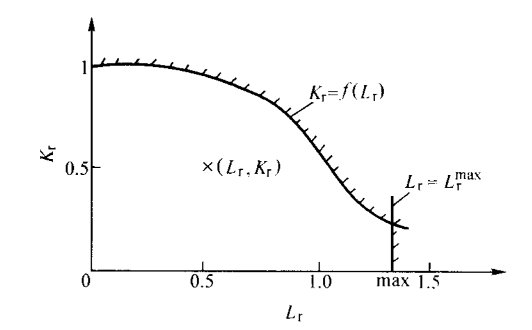


图 9.1-75　新版 R6 失效评定曲线的一般形式

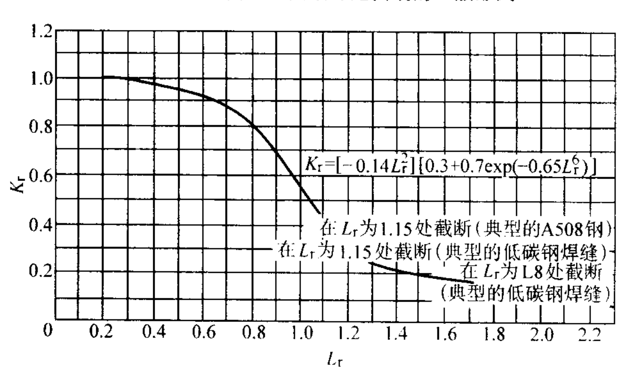


图 9.1-76　应用于选择 1 的通用评定曲线

图中三条垂线反映了三种不同屈强比材料的各自 L_{max} 的位置，该图线在一般情况下较为保守。应当说明，对于具有明显屈服点不连续的材料，使用该选择时必须控制在 $L_r<1.0$ 的数值范围。而对于焊接结构常用的，具有应变时效倾向的 C - Mn（低碳）钢的特殊情况，可以采用图 9.1-77 的失效评定曲线。即 $K_r=\dfrac{1-0.1S_r^2+0.1S_r^4}{1.3S_r^4}$。这是因为在该钢种的应力 - 应变关系的初始阶段显示出高的应变硬化效应所致，而图 9.1-76 通用失效评定曲线所引入的保守程度过高所致。注意此时横坐标仍采用 S_r。

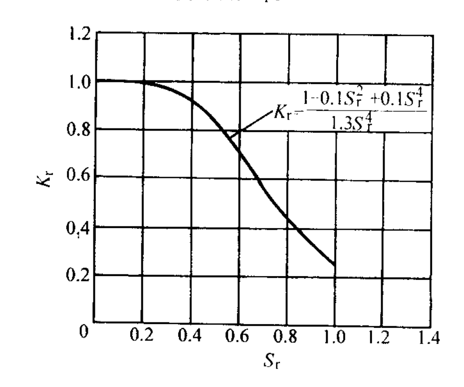


图 9.1-77　低碳钢的失效评定图

选择 2：当具有材料的应力 - 应变关系数据时，可采用本选择。这时失效评定图线可用下式表达：

$$K_r=\left(\frac{E\varepsilon_{ref}}{L_r\sigma_s}+\frac{L_r^3\sigma_s}{2E\varepsilon_{ref}}\right)^{-1/2}\qquad 对于\ L_r\leqslant L_{max}\ (9.1\text{-}48)$$

$$K_r=0,\qquad 对于\ L_r>L_{max}$$

式中，$\varepsilon_{ref}=\ln\ (1+e)$ 为参考应变，即在材料的真应力 - 应变关系曲线上与参考应力对应的应变值。而参考应力可用下式求出，即：$\sigma_{ref}=\sigma_s L_r$，当 $L_r=1$ 时，$\varepsilon_{ref}=\dfrac{\sigma_S}{E}+0.002$；$\sigma_s$ 为材料的下屈服点或 0.2% 时的试验应力。



这一图线适用于所有金属，不论其应力－应变行为如何。但为了制作绘出这一图线，需要材料的详细应力－应变数据，尤其当应变低于1%时更是如此。

选择3：此法较为复杂。为了得到特定材料和特定几何形状的曲线，必须对有缺陷的结构作详细的分析，即在有关载荷条件下对含有裂纹的结构作弹性和弹－塑性分析以便计算 J 积分值和 J_e 值。

$$K_r=(J_e/J)^{1/2}\quad 对于\ L_r\leqslant L_{rmax}\qquad(9.1\text{-}49)$$

$$K_r=0\qquad 对于\ L_r>L_{rmax}$$

同时所有计算 J_e 或 J 的分析必须采用经过验证有效的计算机程序。在进行分析时，必须采用单轴的真实应力－应变关系曲线。换句话说，当材料的 Ramberg－Osgood 曲线无法详知以及 J 积分无法计算时，该选择无法应用。

最后要说明的是这三种选择的截断点 L_{max} 的计算为：

$L_r=L_{rmax}$＝单轴向流变应力 $\bar{\sigma}$/单轴向0.2%试验应力 $\overline{\sigma_s}$。

表9.1-14示出几种失效评定图的比较。

表9.1-14　几种选择的失效评定图

失效评定图	所需要的资料	推荐使用场合
选择1 通用曲线图 若 $L_r\leqslant L_{max}$ $K_r=(1-0.14L_r^2)(0.3+0.7\exp(-0.65L_r^6))$ 若 $L_r>L_{max}$ $K_r=0$	下列各项的平均估值： 下屈服应力点或0.2%试样应力值（σ_s）； 工程流变应力 $\bar{\sigma}=1/2$（$\sigma_s+\sigma_n$）	适用于低应变硬化效应的材料；只需知道 σ_s 和 $\bar{\sigma}$ 即可，而不需知道详细的应力－应变曲线（对于有应变时效效应的低碳钢采用图9.1-78）作为初始筛选试验；不适用于应力－应变曲线具有不连续点的材料
选择2 对于特定材料 若 $L_r\leqslant L_{max}$ $K_r=\left(\frac{E\varepsilon_{ref}}{L_r\sigma_s}+\frac{L_r^3\sigma_s}{2E\varepsilon_{ref}}\right)^{-1/2}$ 若 $L_r>L_{max}$ $K_r=0$	下列各项的平均估值： 全部真实应力－真实应变曲线，其中应详细地确定低于1%的诸应变值； 下屈服应力点或0.2%试样应力值； 工程流变应力 $\bar{\sigma}$	对于高初始应变硬化[①]效应的材料，或已知全部应力－应变关系曲线。适用于具有不连续屈服点的材料
选择3 通过 J 积分 若 $L_r\leqslant L_{rmax}$ $K_r=(J_e/J)^{1/2}$ 若 $L_r>L_{rmax}$ $K_r=0$	按弹性计算 J_e 值，按弹－塑性计算 J 值，作为 L_r 的函数。 下列各项的平均估值： 下屈服应力点或0.2%试验应力值（σ_s）； 全部应力－应变曲线，工程流变应力	用于各种目的 精度取决于J积分的精确性 适用于复杂的受载系统

① 图9.1-78示出了不同材料用选择2求得的评定曲线与选择1的比较。

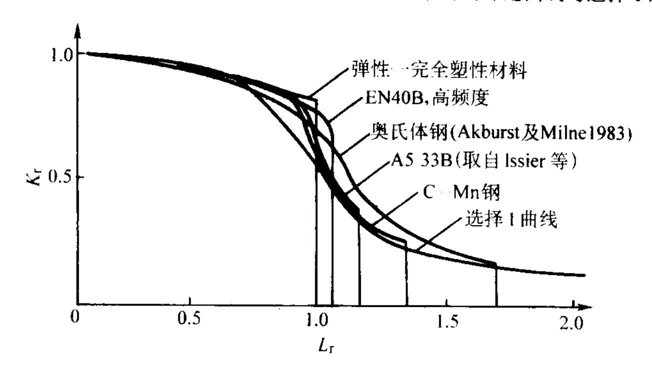


图9.1-78　选择2求得的失效评定图与选择1的失效评定图

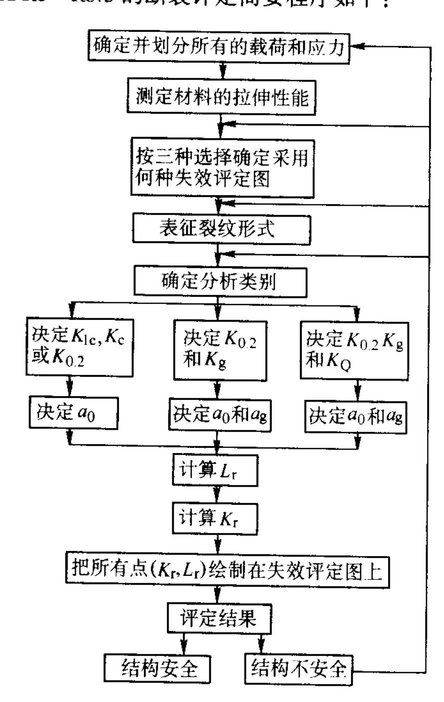
本标准中提出了裂纹启裂和延性扩展分析评定的三种方法或称三个类别。研究表明裂纹启裂并不意味着失去承载能力。延性好的钢，启裂后有一稳态扩展阶段，材料断裂抗力会稳定增长。只有到达一定的临界状态时构件中的缺陷方始失稳扩展。选择哪一种分析方法或类别，取决于分析目的、用途和材料韧度数据的置信度，在这三种不同方法中其断裂韧度准则如下。

1）启裂韧度、分析判定启裂　根据失效分析图，只要承载构件的 K_r，L_r 值在该分析图的评定曲线之下，就不可能发生启裂，这是最简单的情况。

2）简化的撕裂分析　不分析稳定扩展的全过程，而只处理两个点，即启裂点和撕裂扩展量达到 Δa_g 的点（Δa_g 为试样断裂韧度测试时可以得到的最大有效断裂韧性值 K_g 时的扩展量）。

3）它是一种详细分析稳态扩展过程和失稳条件的方法。显然，采用此类分析方法，一定要知道材料的撕裂阻力曲线，或由 $J_p=f(a)$ 推导之。本评定方法特点是考虑了材料加工硬化特性和韧性撕裂结果所导致的断裂韧性值的增加。

R/H/R6－Rev3 的断裂评定简要程序如下：





R/H/R6 评定程序中计算要点如下。

1）L_r 的计算

$$L_r=\frac{能产生\ \sigma_P\ 的应力的总外加载荷}{有裂纹结构的塑性屈服载荷\ \sigma_F}$$

式中，σ_P 为由可导致塑性破坏载荷所引起的应力，即它为由施加载荷、温度或其他位移而引起的应力；σ_F 为塑性屈服载荷，它依赖于材料的屈服点（σ_s）或条件屈服点 $\sigma_{0.2}$，也依赖于所评定缺陷的性质。一般情况下，塑性屈服载荷 =（$\sigma_s/\bar{\sigma}$）× 塑性破坏载荷。

2）K_r 的计算

① 按类别 1 进行分析时 K_r 的计算

$$K_r=K_r^p+K_r^s$$

$$K_r^p=K_I^p\ (a_0)\ /K_{mat}$$

式中，K_I^p 为由可导致塑性破坏应力 σ_I^p 所引起的应力强度因子；K_{mat} 为材料的断裂韧度，或记作 $K_{0.02}$，它表示裂纹扩展 0.2mm 时的断裂韧性值。

$$K_r^s=K_I^s\ (a_0)\ /K_{max}+\rho\ (a_0)$$

式中，K_I^s 为不导致塑性破坏的应力 σ_S（如焊接残余应力）所引起的应力强度因子；ρ 为计算参数，它取决于裂纹长度和 σ_P 应力的大小，其简单的计算方法为：

当 $L_r\leqslant 0.8$ 时，$\rho=\rho_1$

$0.8<L_r<1.05$ 时，$\rho=4\rho_1\ (1.05-L_r)$

$1.05<L_r$ 时，$\rho=0$

另外，当 $K_I^s/\ (K_I^p/L_r)\ <0$ 时，$\rho_1=0$

当 $0<K_I^s/(K_I^p/L_r)<5.2$ 时，由图 9.1-79 计算 ρ_1

当 $5.2<K_I^s/\ (K_I^p/L_r)$ 时，$\rho_1=0.25$

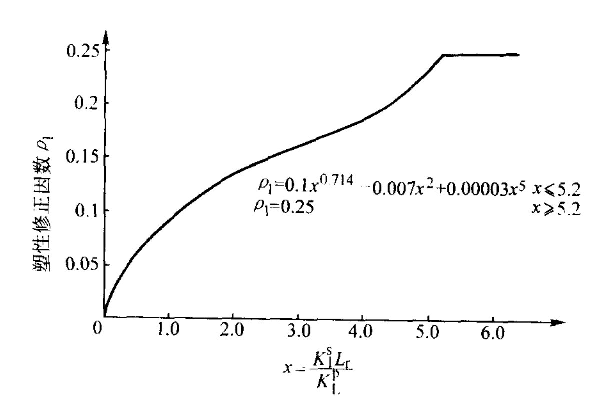


图 9.1-79　用以说明 K_I^s 的 ρ_1 值

② 按类别 2 进行分析时的 K_r 计算　按类别 2 进行分析时，需要两个 K_r 值，其中一个的计算方法是按照 $K_{mat}=K_{0.2}$ 计算，并用符号 K_{r0} 表示。第二个值是以一个特定的裂纹韧性扩展量 Δa_g 之后算出的，并以符号 K_{rg} 表示

$$K_{rg}=K_{rg}^p+K_{rg}^s$$

$$K_{rg}^p=K_I^p(a_g)/K_g$$

$$K_{rg}^s=[K_I^s(a_g)/K_g]+\rho(a_g)$$

式中，a_g 为原始裂纹尺寸加上裂纹扩展量 Δa_g 的裂纹尺寸；K_g 为经过了特定量的韧性撕裂 Δa_g 之后提高了的断裂韧度。

③ 按类别 3 进行分析时 K_r 的计算　按类别 3 进行分析时，对于一系列裂纹尺寸均要求已知 K_r 值。开始时可按本节上述的①程序 K_{mat} 的以作为 $K_{0.2}$ 对应于原来裂纹尺寸 a_0 进行计算。然后，再求出对应于原始裂纹尺寸加上假设的裂纹扩展量 Δa_j，作为裂纹尺寸 a_j 的值进行计算。相应的 K_r 值按下式计算：

$$\begin{cases}K_r^p=K_I^p\ (a_j)\ /K_Q\ (\Delta a_j)\\ K_r^s=K_I^s\ (a_j)\ /K_Q\ (\Delta a_j)\ +\rho\ (a_j)\end{cases}$$

式中，K_Q（Δa_j）为给定韧性撕裂量 Δa_j 之后的断裂韧度。

3.2.2　BS7910 评定方法

目前 R6 方法是国际上最有影响的安全评定方法之一，可以说受 R6 规范的影响，PD 6493－80 于 1989 年颁布了新的版本，对 PD 6493－80 作了较大的修改。同时也出现了相似的方法、文件。其中最主要的是考虑了塑性失稳的影响和引入三级评定。不久前又经过部分修改，作为英国国家标准 BS 7910 予以颁布。

按照 BS 7910 评定面型缺陷有三个级别，选用何种级别评定程序与所选材料、可提供的相关数据以及精确程度有关。其中初级评定程序为最简单的评定方法，当材料性能数据有限时，可采用保守的施加应力、残余应力和断裂韧性值。评定程序结果可保证其安全系数为 2。第二级评定为常规的评定程序。第三级主要是对高应变硬化指数的材料或需要分析裂纹稳定撕裂断裂时，才考虑使用此方法。对于常用的焊接结构用钢，一般不采用此程序。

（1）初级评定

按图 9.1-80 所示流程图进行评定。初级评定分为级别 1A 和级别 1B。

1）初级评定的 1A 程序　采用 K_{mat}（K_{IC}）参量的评定：如果 $K_r<1/\sqrt{2}=0.707$ 和 $S_r<0.81$，则缺陷是可以接受的。

$$K_r=\frac{K_1}{K_{mat}},\quad S_r=\frac{\sigma_{ref}}{\sigma_f}$$

式中，$K_1=\sigma_1\sqrt{\pi a}$ 对贯穿缺陷；$K_1=\frac{M_m}{\phi}\sigma_1\sqrt{\pi a}$ 对局部贯穿缺陷；ϕ 为形状系数，见图 9.1-81；M_m 为与局部贯穿缺陷位置有关的系数（其值分别示于图 9.1-82 和图 9.1-83 中）（在 90°参数角情况下，即沿裂纹前缘最深点，$\theta=90°$）；K_{mat} 为断裂韧度［其值可按标准测试，也可通过 J 方法经换算得出，但不允许在 COD（δ）与 K_{mat} 之间换算］；σ_{ref} 为参考应力；σ_f（$\bar{\sigma}$）为流变应力（但在本评定中 σ_f 的最大值不超过 $1.2\sigma_S$，在超过 $1.2\sigma_S$ 情况下，计算中仍认为 $\sigma_f=1.2\sigma_S$）。

应当说明，对于 1A 评定级别，当无法提供 K_{mat} 或 J_{mat} 数据时，此数据可由夏比冲击功转换得到，此时对于大多数的钢材处于下平台转变温度区，按下式转换：

$$K_{mat}=\frac{820\ \sqrt{C_V}-1420}{B^{1/4}}+630$$

式中，K_{mat} 为断裂韧度下限值，MPa·mm$^{1/2}$；B 为对应评定 K_{mat} 时的材料厚度，mm；C_V 为服役温度时的夏比缺口冲击功，J。

同时也可由图 9.1-84 查出。

对于处于上平台区，即冲击时表现为 100% 剪切断裂特征，可由下式转换：

$$K_{mat}=17C_V+1740$$

K_{mat} 和 C_V 同上，也可由图 9.1-85 查出。

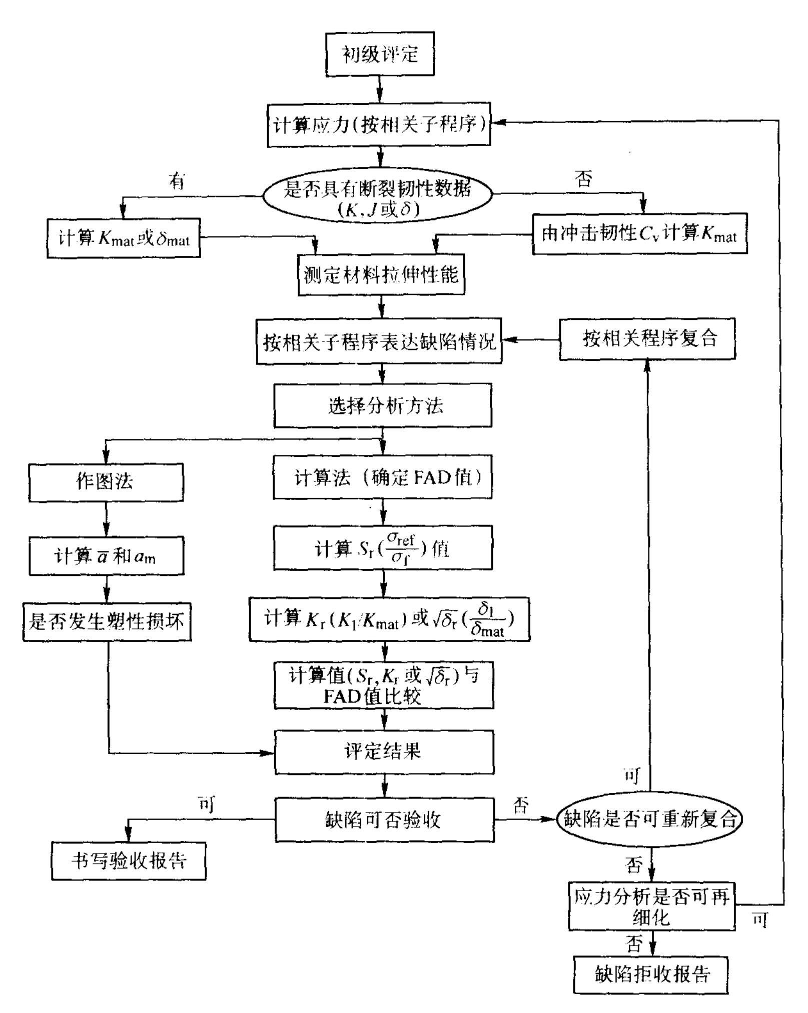


图 9.1-80　初级评定流程图

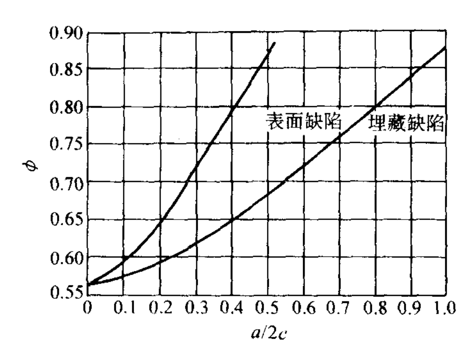


图 9.1-81　缺陷形状参数 φ

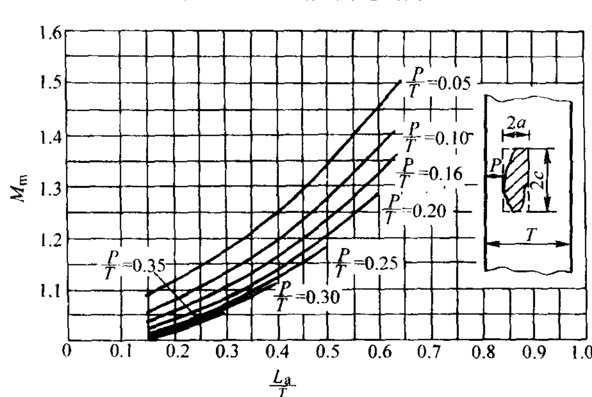


图 9.1-82　拉伸情况下埋藏缺陷修正系数 M_m

2）初级评定的 1B 程序　此时评定不采用 FAD 图，而由计算求得允许裂纹尺寸，采用断裂力学关系式（9.1-50）计算可接受的缺陷尺寸 $\overline{a}_m$ 并带有 2 倍的安全系数。

$$\overline{a}_m = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K_{mat}}{\sigma_1}\right)^2 \tag{9.1-50}$$

或 $\overline{a}_m = \dfrac{\delta_{mat}E}{2\pi\ (\sigma_1/\sigma_s)^2\sigma_s}$，对于钢材和铝合金，$\sigma_1/\sigma_s < 0.5$ 和对所有其他材料的任意 σ_1/σ_s 比值情况。

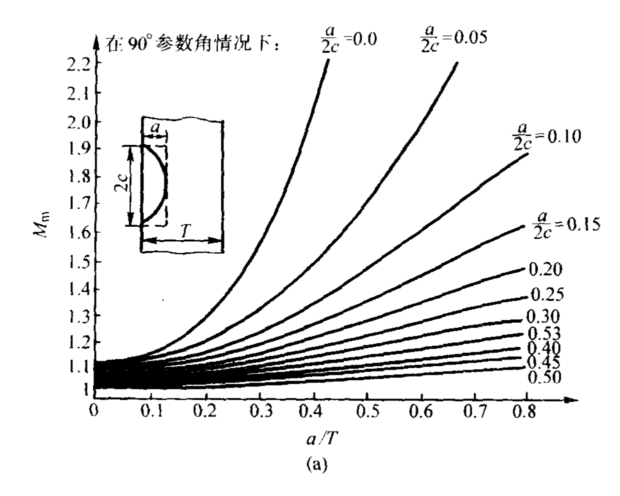
当 $\sigma_1/\sigma_s > 0.5$，$\overline{a}_m = \dfrac{\delta_{mat}E}{2\pi\left(\dfrac{\sigma_1}{\sigma_s} - 0.25\right)\sigma_s}$ 对于钢材和铝合金。

在一般情况下，在求得缺陷尺寸后，还需计算 S_r 进行延性失稳校核，并限制 S_r 最大值为 0.8。在没有塑性失稳可能性的情况，可根据上述方程式，根据施加应变比值 e/e_s（$=\sigma_1/\sigma_s$）来估算 a_m，直到施加应变比值最大时为止。对于应变比值超过 2 的情况，建议进行弹塑性应力分析。在应变集中区估算塑性应变的一种方法是利用 Neuber 假设，即塑性应变与应变集中系数的乘积等于弹性应力集中系数的平方。

在所考虑的构件为有限板宽时，并且又在所计算出的 $\overline{a}_m$ 值超过总宽 1/20 的情况下，则需将所计算出的 $\overline{a}_m$ 值乘以 $1/(2\overline{a}_m/W+1)$ 进行修正，式中 W 为构件宽度。

得到缺陷尺寸 $\overline{a}_m$ 之后，等效局部贯穿缺陷尺寸可分别由有关图形（如图 9.1-72、图 9.1-73）得出。





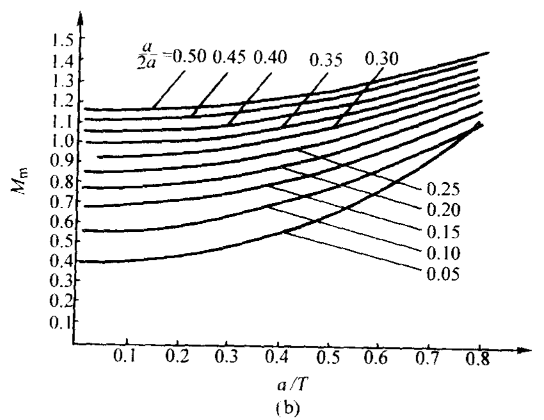


图 9.1-83 拉伸情况下表面缺陷修正系数 M_m

（在90°参数角情况下，即沿裂纹前缘最深点，$\theta=90°$）

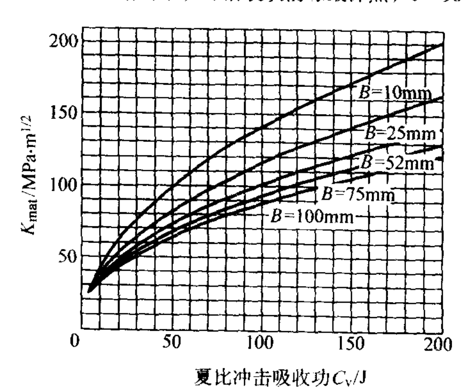


图 9.1-84 针对下平台区的 K_{mat} 和夏比冲击功 C_V 之间的关系曲线

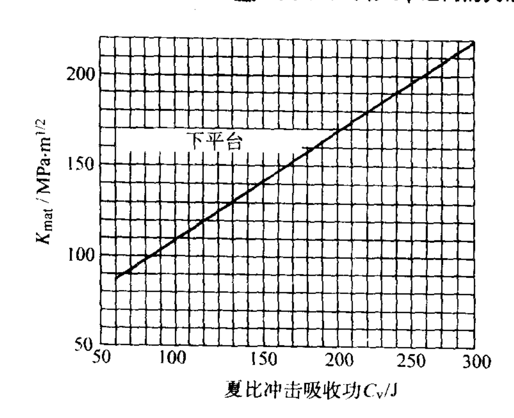


图 9.1-85 针对上平台区的 K_{mat} 和夏比冲击功 C_V 之间的关系曲线

应当指出：在此评定程序中，对于焊态结构，计算纵向残余应力（与焊缝平行的残余应力）时，其值等于缺陷所处材质室温下的屈服极限，而对于横向残余应力（与焊缝垂直的残余应力），其值则等于母材或焊缝二者较低的室温下的屈服强度值。而对于经过热处理的焊接结构，焊接残余应力应当在焊缝或母材试件上通过试验测取，在不具备上述条件时，BS7910 规定：

对于碳锰钢和低合金钢，热处理炉中温度为 580～620℃时，纵向残余应力为缺陷所处材质室温下屈服限的 30%，而横向残余应力取为母材或焊缝室温下两者最小屈服限值的 20%，由于局部热处理温度难以控制和保证，因而残余应力仍按焊态结构处理。文件中同样规定对于振动消应力方法处理的焊接构件中，其消除残余应力的效果不予考虑。

（2）常规评定

其中包括两种方法，每种方法中有独自的评定曲线方程和截止限，如果被评定点落入坐标轴线的评定曲线（包括面积）之内，则该缺陷可以验收，如果被评定点落入评定曲线上或评定曲线之外，则缺陷被判拒收。截止限用来防止局部塑性破坏，在此级评定标准中：

$$L_{rmax}=(\sigma_s+\sigma_u)/(2\sigma_s)$$

1）级别 2A　该级别不需要应力－应变关系数据，其评定曲线方程为：

当 $L_r\leqslant L_{rmax}$ 时，$\sqrt{\delta_r}$ 或 $K_r=(1-0.14L_r^2)\{0.3+0.7\exp(-0.65L_r^6)\}$；　(9.1-51)

当 $L_r>L_{rmax}$ 时，$\sqrt{\delta_r}$ 或 $K_r=0$　(9.1-52)

评定曲线如图 9.1-86 所示，不同材料具有不同的截止限。

对于在应力－应变关系上具有屈服平台的材料，此时应选取截止限 $L_{rmax}=1$ 或按级别 2B 进行评定。假如不能建立级别 2B 的评定曲线，则 $L_r\geqslant1.0$ 时，可采用下述方程确立评定曲线：

$$\sqrt{\delta_r}(L_r=1)\text{或}K_r(L_r=1)=\{1+E\varepsilon_L/\sigma_S^u+1/[2(1+E\varepsilon_L/\sigma_S^u)]\}^{-0.5}$$

式中，$\varepsilon_L=0.0375\ (1-\sigma_S^u/100)$ 为所采用的假定的屈服平台长度，该式限于 $\sigma_S^u<976\ \text{N/mm}^2$

σ_S^u 为屈服限的最大值，假如评定中难以提供此值，则可保守应用屈服限或 $\sigma_{0.2}$ 值。

$$\sqrt{\delta_r}(L_r>1)=\sqrt{\delta_r}(L_r=1)L_r^{(N-1)/2N}$$

或者

$$K_r(L_r>1)=K_r(L_r=1)L_r^{(N-1)/2N}$$

式中，$N=0.3\ (1-\sigma_S/\sigma_u)$ 为应变硬化指数的最小值。

2）级别 2B　材料特定曲线　此方法适用于各种类型的母材和焊缝，它一般给出较级别 2A 精确的结果，但它需要较多的数据，它需要应力－应变曲线，因而它难以应用于热影响区（因此热影响区只可应用级别 2A），且焊缝或母材的应力－应变关系应在所需的温度下测试，同时需要屈服强度值或 $\sigma_{0.2}$、抗拉强度及弹性模量，尤其需要注意应变小于 1%应力－应变曲线关系形状。

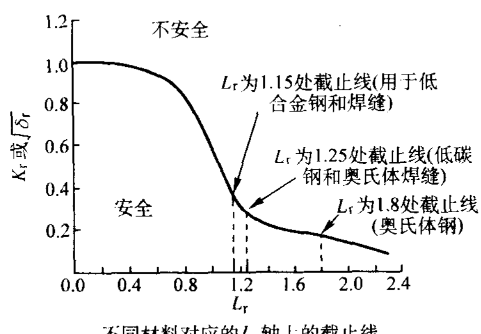
建议工程应力－应变曲线应当在下述 σ/σ_S 值下精确测定。

$\sigma/\sigma_S=0.7$，0.9，0.98，1.0，1.02，1.1，1.2，并将以 0.1 的间隔递增至 σ_u 值。

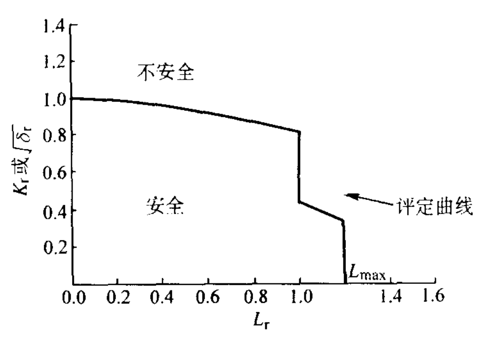
级别 2B 的评定曲线如下式所示：

当 $L_r\leqslant L_{rmax}$ 时，$\sqrt{\delta_r}$ 或 $K_r=\left(\dfrac{E\varepsilon_{ref}}{L_r\sigma_S}+\dfrac{L_r^3\sigma_S}{2E\varepsilon_{ref}}\right)^{-0.5}$

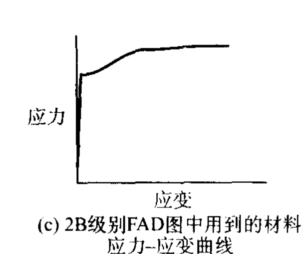
当 $L_r>L_{rmax}$ 时，$\sqrt{\delta_r}$ 或 $K_r=0$



(a) 2A级别FAD图



(b) 2B级别FAD图(根据图9.1-86c中的应力-应变曲线)



(c) 2B级别FAD图中用到的材料应力-应变曲线

图 9.1-86 级别 2 的评定曲线图

式中，ε_{ref}为真应变，其值为单向拉伸应力－应变曲线的真应力 $L_r\sigma_S$，对于大多数应用情况可以采用工程应力－应变数据，但是应当注意对 σ_S 周围的点进行仔细计算，典型的FAD图和相关的应力－应变关系曲线如图 9.1-86b 和 c 所示。

在常规（级别2）评定中，应考虑缺陷附近的实际应力值，应力成分为膜应力和弯曲应力，如需要应乘以局部安全系数，假如最终推导的应力强度因子为负值，则在评定中认为其为零值。

在残余应力计算时，可以和级别1一样，认为残余应力是均匀分布的（有时也可以认为是不均匀分布），在残余应力均匀分布时，认为残余应力 Q_m 可以为下述二式中的最小值。

$$Q_m = \sigma'_S \tag{9.1-53}$$

或 $$Q_m = (1.4 - \sigma_{ref}/\sigma'_f)\ \sigma'_S \tag{9.1-54}$$

式中，σ'_S 是材料在评定温度下的屈服点，但该温度不能低于室温，式（9.1-53）中应采用室温下的屈服点；σ'_f 为流变强度，一般为屈服点和抗拉强度之和的平均值；σ_{ref}为参考应力，对于不同构件有不同的解，例如对于平板上贯穿厚度缺陷：

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + (P_b^2 + 9P_m^2)^{0.5}}{3\left\{1 - \left(\frac{2a}{W}\right)\right\}}$$

对于平板中表面裂纹：

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + (P_b^2 + 9P_m^2(1 - a'')^2)^{0.5}}{3(1 - a'')^2}$$

式中，当 $W \geqslant 2(c + B)$时，$a'' = (a/B)/\{1 + (B/c)\}$，当 $W < 2(c + B)$时，$a'' = (2a/B)(c/W)$；a 为裂纹深度；B 为厚度；$2c$ 为裂纹长度。

对于埋藏裂纹：

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + 3P_m a'' + \left[(P_b + 3P_m a'')^2 + 9P_m^2\ (1 - a'')^2 + 4\left(\frac{pa''}{B}\right)\right]^{0.5}}{3\left\{(1 - a'')\ + 4\left(\frac{pa''}{B}\right)\right\}^2}$$

式中，当 $W \geqslant 2(c + B)$时，$a'' = (2a/B)/\{1 + (B/c)\}$，当 $W < 2(c + B)$时，$a'' = (4a/B)(c/W)$。

对于消应热处理的结构，仍按级别1中讲述的方法确定焊接残余应力值。

在此程序中，断裂韧度比值 K_r 的计算中：

$$K_r = \frac{K_I}{K_{max}}$$

在应力强度因子 K_I 计算中需考虑整体应力形成的应力集中，也需考虑局部弯曲应力（如不平度引起的弯曲应力）引起的应力增加，可采用相关手册，数值模拟或重量函数方法计算此时的 K_I 值。

当有二次应力如残余应力存在时，还应考虑一次应力和二次应力之间的相互作用，因而需采用塑性矫正系数 ρ

即 $$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} + \rho$$

当 $K_I^S/(K_I^P/L_r) \leqslant 0.4$ 时，可以采用本节中介绍的 R6 方法计算 ρ，但$K_I^S/(K_I^P/L_r) > 0.4$或只有二次应力作用时，ρ 可由下式计算 $\rho = \Psi - \phi\left(\frac{K_I^S}{K_P^S} - 1\right)$，如此值结果为负值，则取该 ρ 为零，一般情况下，Ψ 和 ϕ 可由表 9.1-15 和表 9.1-16 确定。

而在断裂韧度比值 δ_r 中，应采用下述公式由 K_I 推导计算：

$$\delta_I = \frac{K_I^2}{X\sigma_S E'}$$

X 值一般在 1～2 之间，其值和裂纹尖端情况、几何拘束度及材料的加工硬化有关。在结构分析有困难时，可采用 $X = 1$。另外除弹塑性力学计算方法外，X 也可由下述试验关系确定。

$$X = \frac{J_{mat}}{\sigma_S \delta_{mat}\ (1 - v^2)}$$

当不存在二次应力时，与 K_r 相似

$$\sqrt{\delta_r} = \sqrt{\delta_I/\delta_{mat}}$$

表 9.1-15　Ψ 和 L_r 以及 $K_P^S/(K_I^P/L_r)$ 的关系表

L_r	$K_P^S/(K_I^P/L_r)$										
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	0.020	0.043	0.063	0.074	0.081	0.086	0.090	0.095	0.095	0.100	0.107
0.2	0.028	0.052	0.076	0.091	0.100	0.107	0.113	0.120	0.120	0.127	0.137
0.3	0.033	0.057	0.085	0.102	0.114	0.122	0.130	0.138	0.138	0.147	0.160
0.4	0.037	0.064	0.094	0.113	0.126	0.136	0.145	0.156	0.156	0.167	0.182
0.5	0.043	0.074	0.105	0.124	0.138	0.149	0.160	0.172	0.172	0.185	0.201
0.6	0.051	0.085	0.114	0.133	0.147	0.159	0.170	0.184	0.184	0.200	0.215
0.7	0.058	0.091	0.117	0.134	0.147	0.158	0.171	0.186	0.186	0.202	0.214
0.8	0.057	0.085	0.105	0.119	0.130	0.141	0.155	0.169	0.169	0.182	0.190
0.9	0.043	0.060	0.073	0.082	0.090	0.101	0.113	0.123	0.123	0.129	0.132
1.0	0.016	0.019	0.022	0.025	0.031	0.039	0.043	0.044	0.044	0.41	0.033
1.1	-0.013	-0.025	-0.033	-0.036	-0.037	-0.042	-0.050	-0.061	-0.061	-0.073	-0.084
1.2	-0.034	-0.058	-0.075	-0.090	-0.106	-0.122	-0.137	-0.151	-0.151	-0.164	-0.175
1.3	-0.043	-0.075	-0.102	-0.126	-0.147	-0.166	-0.181	-0.196	-0.196	-0.209	-0.220
1.4	-0.044	-0.080	-0.109	-0.134	-0.155	-0.173	-0.189	-0.203	-0.203	-0.215	-0.227
1.5	-0.041	-0.075	-0.103	-0.127	-0.147	-0.164	-0.180	-0.194	-0.194	-0.206	-0.217
1.6	-0.037	-0.069	-0.095	-0.117	-0.136	-0.153	-0.168	-0.181	-0.181	-0.194	-0.205
1.7	-0.033	-0.062	-0.086	-0.107	-0.125	-0.141	-0.155	-0.168	-0.168	-0.180	-0.191
1.8	-0.030	-0.055	-0.077	-0.096	-0.114	-0.129	-0.142	-0.155	-0.155	-0.166	-0.177
1.9	-0.026	-0.049	-0.069	-0.086	-0.102	-0.116	-0.129	-0.141	-0.141	-0.152	-0.162
2.0	-0.023	-0.043	-0.061	-0.076	-0.091	-0.104	-0.116	-0.126	-0.126	-0.137	-0.146

表 9.1-16　ϕ 和 L_r 以及 $K_P^S/(K_I^P/L_r)$ 的关系表

L_r	$K_P{}^S/(K_I^P/L_r)$										
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
0	0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
0.1	0	0.815	0.869	0.877	0.880	0.882	0.883	0.883	0.882	0.879	0.874
0.2	0	0.690	0.786	0.810	0.821	0.828	0.832	0.833	0.833	0.831	0.825
0.3	0	0.596	0.715	0.752	0.769	0.780	0.786	0.789	0.789	0.787	0.780
0.4	0	0.521	0.651	0.696	0.718	0.732	0.740	0.744	0.745	0.743	0.735
0.5	0	0.457	0.589	0.640	0.666	0.683	0.693	0.698	0.698	0.695	0.688
0.6	0	0.399	0.528	0.582	0.612	0.631	0.642	0.647	0.648	0.644	0.638
0.7	0	0.344	0.466	0.522	0.554	0.575	0.587	0.593	0.593	0.589	0.587
0.8	0	0.290	0.403	0.460	0.493	0.516	0.528	0.533	0.534	0.534	0.535
0.9	0	0.236	0.339	0.395	0.430	0.452	0.464	0.470	0.475	0.480	0.486
1.0	0	0.185	0.276	0.330	0.364	0.386	0.400	0.411	0.423	0.435	0.449
1.0	0	0.139	0.218	0.269	0.302	0.326	0.347	0.367	0.387	0.406	0.423
1.2	0	0.104	0.172	0.219	0.256	0.287	0.315	0.340	0.362	0.382	0.399
1.3	0	0.082	0.142	0.190	0.229	0.263	0.291	0.316	0.338	0.357	0.375
1.4	0	0.070	0.126	0.171	0.209	0.241	0.269	0.293	0.314	0.333	0.350
1.5	0	0.062	0.112	0.155	0.190	0.220	0.247	0.270	0.290	0.309	0.325



续表 9.1-16

L_r	$K_P^S/(K_I^P/L_r)$										
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
1.6	0	0.055	0.100	0.139	0.172	0.200	0.225	0.247	0.267	0.285	0.301
1.7	0	0.048	0.089	0.124	0.154	0.181	0.204	0.224	0.243	0.260	0.276
1.8	0	0.042	0.078	0.110	0.137	0.161	0.183	0.202	0.220	0.236	0.250
1.9	0	0.036	0.068	0.096	0.120	0.142	0.162	0.180	0.196	0.211	0.225
2.0	0	0.031	0.058	0.082	0.104	0.124	0.141	0.157	0.172	0.186	0.198

当有二次应力作用时

$$\sqrt{\delta_r}=\sqrt{\delta_I/\delta_{mat}}+\rho$$

ρ 仍由本节上述方法处理。

除 K_r，级别2评定曲线的横坐标以载荷比 L_r 表示。

$L_r=\frac{\sigma_{ref}}{\sigma_S}$，截止限 $L_{rmax}=(\sigma_S+\sigma_u)/(2\sigma_S)$

(3) 韧性撕裂评定方法（级别3）

此级别评定主要用于具有稳定撕裂特征的韧性材料（例如奥氏体钢、在韧－脆温度转变上平台区间工作的铁素体材料），其主要特点是断裂时的韧性撕裂分析。根据评定曲线的不同又分为三个级别，即级别3A、级别3B和级别3C。

1）级别3A　其FAD图形与级别2A相同，此时不需要应力－应变关系曲线［见级别2A中计算式（9.1-51）和式（9.1-52）］。

对于具有屈服平台的材料，应用级别3A评定曲线，限于 $L_r\leqslant1.0$。

2）级别3B　与级别2B相同，建立评定曲线需要应力－应变关系数据，应变值小于10%的数据尤为重要。此FAD图形适用于所有金属材料，而不考虑其应力－应变曲线性质如何。

3）级别3C（J积分方法）　此法较为复杂。为了得到特定材料和特定几何形状的曲线，必须对有缺陷的结构作详细的分析，即在有关载荷条件下对含有裂纹的结构作弹性和弹－塑性分析以便计算 J 积分值和 J_e 值。

$$K_r=(J_e/J)^{1/2},\quad 对于\ L_r\leqslant L_{max}\qquad(9.1\text{-}55)$$

$$K_r=0\quad 对于\ L_r>L_{max}$$

同时所有计算 J_e 或 J 的分析必须采用经过验证有效的计算机程序。在进行分析时，必须采用单轴的真实应力－应变关系曲线。换句话说，当材料的 Ramberg－Osgood 曲线无法详知以及 J 积分无法计算时，该级别无法应用。

在级别3的评定中应力分量计算以及残余应力计算均与级别2一致。而韧性撕裂分析中需建立 K_{mat}、J_{mat} 或 δ_{mat} 与裂纹扩展量 Δa 的函数关系，因此需进行R阻力曲线测定，而本标准又规定采用 BS 7448－4 进行此项阻力曲线测试（见上节）。而评定中采用的参量如下所示。

Δa_g——可进行分析的裂纹扩展界限值，它可以为全厚度试验下测定的试验数据，也可以对较薄特定试样的对应 J 积分有效值的裂纹扩展值。

K_g 或 δ_g——裂纹扩展界限值 Δa_g 时的 K_{mat} 或 δ_{mat}，之后将 Δa_0 到 Δa_g 的区间等分若干小扩展阶段，并计算对应各阶段值（例如 $\Delta a_0+\Delta a_1$）的 K_{mat} 或 δ_{mat} 值。

具体评定程序如下。

① 规定初始缺陷尺寸 a_0。

② 按 BS 7448－4 测定 K_{mat} 或 δ_{mat} 值。

③ 定义 Δa_g 值。

④ 如 $\Delta a_g<1.0$ mm，按下式计算 L_r、K_r 或 δ_r。

$$K_r=\frac{K_I}{K_g}+\rho$$

或

$$\sqrt{\delta_r}=\sqrt{\frac{\delta_I}{\delta_g}}+\rho$$

K_I、δ_I 和 σ_{ref} 为 $a=a_0+\Delta a_g$ 值时的测定值。

⑤ 假如 $1.0\ \text{mm}<\Delta a_g<5.0$ mm，则规定裂纹扩展阶段值 Δa_j 为：

$\Delta a_0=0$

$\Delta a_1=1.0$ mm

$\Delta a_2=2.0$ mm 等。

如果 $\Delta a_g>5.0$ mm，则规定裂纹扩展阶段值 Δa_j 为：

$\Delta a_0=0$

$\Delta a_1=1.0$ mm

$\Delta a_2=0.2\Delta a_g$

$\Delta a_3=0.4\Delta a_g$ 等。

计算 L_r（$L_r=\frac{\sigma_{ref}}{\sigma_S}$）和 K_r 或 δ_r（$K_r=\frac{K_I}{K_g}+\rho$ 和 $\sqrt{\delta_r}=\sqrt{\frac{\delta_I}{\delta_g}}+\rho$）。

在裂纹长度为 $a=a_0$，$a_0+\Delta a_1$，$a_0+\Delta a_2$ 等处计算 K_I、δ_I、K_{mat}、δ_{mat} 和 σ_{ref}。

⑥ 以坐标点形式在失效评定图上画出各对应的 L_r-K_r 或 $L_r-\sqrt{\delta_r}$ 数据值。

⑦ 如果 L_r-K_r 或 $L_r-\sqrt{\delta_r}$ 的轨迹线完全落于评定曲线之外，则缺陷不能接受，假如该轨迹线通过评定线，则认为可以发生韧性撕裂，因此可主张验收此缺陷。

最后应当说明级别2和级别3的评定曲线均未考虑安全系数，因此在评定中可根据失效概率自行对缺陷尺寸、应力分量、断裂韧度及屈服强度规定和纳入安全系数，如表9.1-17所示。

表 9.1-17　针对可能的断裂形式推荐采用的安全系数

项　目		$p(F)2.3\times10^{-1}$	$p(F)10^{-3}$	$p(F)7\times10^{-5}$	$p(F)10^{-5}$
		$\beta_r=0.739$	$\beta_r=3.09$	$\beta_r=3.8$	$\beta_r=4.27$
应力 σ	$(COV)_\sigma$	γ_σ	γ_σ	γ_σ	γ_σ
	0.1	1.05	1.2	1.25	1.3
	0.2	1.1	1.25	1.35	1.4
	0.3	1.12	1.4	1.5	1.6
缺陷尺寸 a	$(COV)_a$	γ_a	γ_a	γ_a	γ_a
	0.1	1.0	1.4	1.5	1.7
	0.2	1.05	1.45	1.55	1.8
	0.3	1.08	1.5	1.65	1.9
	0.5	1.15	1.7	1.85	2.1



续表 9.1-17

项　目		$p(F)2.3\times10^{-1}$	$p(F)10^{-3}$	$p(F)7\times10^{-5}$	$p(F)10^{-5}$
		$\beta_r=0.739$	$\beta_r=3.09$	$\beta_r=3.8$	$\beta_r=4.27$
韧度 K	$(COV)_K$	γ_K	γ_K	γ_K	γ_K
	0.1	1	1.3	1.5	1.7
	0.2	1	1.8	2.6	3.2
	0.3	1	2.85	NP	NP
韧度 δ	$(COV)_\delta$	γ_δ	γ_δ	γ_δ	γ_δ
	0.2	1	1.69	2.25	2.89
	0.4	1	3.2	6.75	10
	0.6	1	8	NP	NP
屈服强度	$(COV)_S$	γ_S	γ_S	γ_S	γ_S
	0.1	1	1.05	1.1	1.2

3.2.3　日本 WES－2805k 评定要点

1974 年发展起来的日本 WES－2805k 标准在概念上与早年的英国提出的 COD 设计曲线相似。但以应变参量为主，即待评定部位的应变值由施加应力形式的应变 e_1，残余应力形成的应变 e_2 和应变集中产生的应变 e_3 叠加而成，它们是在 4 倍裂纹长度标距上测取的。

起初采用公式 $\phi=\dfrac{\delta_c}{2\pi e_s a}=0.577\ (e/e_s)$　　(9.1-56)

表征允许裂纹尺寸与应变之间的关系。

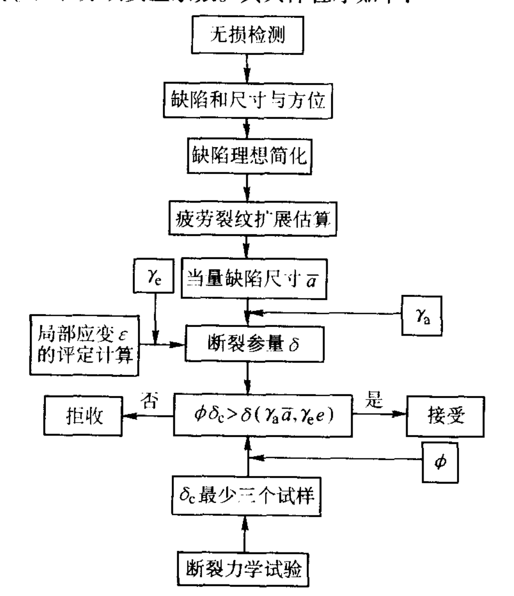
20 世纪 80 年代日本焊接工程师协会的下属一个分研究委员会进行了一系列（共 147 组数据）宽板拉伸试验，来验证日本 WES－2805K 标准的确切性，结果表明，不少试验结果数据落于该曲线的不安全之侧，特别是标称断裂应变 e 大于屈服应变时更是如此，且有很大分散性，说明该关系式可靠性不高，研究认为造成上述结果是由于 $e_1+e_2+e_3$ 的提案有误。因此对 e_3 的计算作了研究和修改，并在此基础上提出了新的关系式。

$$\delta=2e_s\bar{a}\ (\bar{e}/e_s)^2\qquad 对于\ \bar{e}/e_s\leqslant1\qquad(9.1\text{-}57)$$

$$\delta=e_s\bar{a}\ (3.5\bar{e}/e_s-1.5)\qquad 对于\ \bar{e}/e_s>1$$

上述关系式的有效性已在管道接头应用中得到了证实。

1996 年在国际焊接年会上日本东京大学的 Machida.S 教授提出一份报告，这份报告随后成为 WES－1997 的文件，其主要内容为对上述关系式再次作了修改；应变集中 e_3 的修改；在附录中补充了概率方法内容。修改后的评定程序引入了 γ_a、γ_e 和 ϕ 分项安全系数。其具体程序如下：



1）关于应变集中系数计算公式　97 版 WES－2805 提出用下式估算 ε_3

$$\varepsilon_3=(K_\varepsilon-1)\ \varepsilon_1$$

式中，K_ε 是 K_t 和 $\varepsilon/\varepsilon_3$ 的函数。

$$K_\varepsilon=K_t\qquad 当\ K_t-\sigma\leqslant\sigma_S$$

$$K_\varepsilon=K_t+A(\varepsilon/\varepsilon_s-1/Kt)\qquad 当\ \sigma_{net}\leqslant\sigma_S\leqslant K_t-\sigma$$

式中，$A=\lambda\ (K_t^{2/(1+n)}-K_t)\ /\ (1-\lambda/Kt)$

$$n=0.12\ln\ (1\ 390/\sigma_S)$$

$\lambda=\sigma_{net}/\sigma$　σ_{net} 为净截面应力。

2）仍以 COD 设计曲线为基础，即其判据标准为驱动力 (δ) ≥材料断裂韧度 δ_c 值，其中

$$\delta=\frac{\pi}{2}(\varepsilon/\varepsilon_s)^2\varepsilon_s\bar{a}\qquad \varepsilon/\varepsilon_s\leqslant1.0\qquad(9.1\text{-}58)$$

$$\delta=\frac{\pi}{8}\{9(\varepsilon/\varepsilon_s)-5\}\varepsilon_s\bar{a}\qquad \varepsilon/\varepsilon_s>1.0$$

3）报告及 97 年版 WES－2805 最大的改动是在附录中引入了基于可靠度分析的安全系数，即用改进的一阶二次矩方法（简称 AFOSM）对评定所需的数据 $\bar{a}$、ε 和 δ_c 进行敏感性分析和确定 $\bar{a}$、ε 和 δ_c 的分项安全系数 γ_a、γ_e 和 ϕ。

① 首先定出极限状态函数 $Z=\delta_c-\delta$

即　$$Z=\delta_c-\frac{\pi}{2}(\varepsilon/\varepsilon_s)^2\varepsilon_s\bar{a}\qquad \varepsilon/\varepsilon_s\leqslant1.0\ (9.1\text{-}59)$$

$$Z=\delta_c-\frac{\pi}{8}\{9(\varepsilon-\varepsilon_s)-5\}\varepsilon_s\bar{a}\qquad \varepsilon/\varepsilon_s>1.0$$

如 $Z>0$　安全；$Z<0$　不安全

② 根据 AFOSM，可靠度指标

$$\beta=\mu_Z/\sigma_Z$$

式中，μ_Z 为极限状态函数 Z 的标称值；σ_Z 为极限状态函数 Z 的方差。

该式的精确含义为从坐标原点到失效面（$Z=0$）最近的距离，在该坐标系中所有的变量都要转换成标准正态分布。

在 Machida 报告和 WES－2805－97 标准中设定三种可靠度指标 $\beta=1$、2、3，其对称的失效概率分别为 15.9%、2.27%和 0.13%。

③ 在评定所需的数据 $\bar{a}$、ε 和 δ_c 概率特征中，该报告假定 ε 和 $\bar{a}$ 服从正态分布，其标称值为 μ_e 和 μ_a。方差为 σ_e 和 σ_a。ε 和 $\bar{a}$ 的变异系数 COV（$\bar{a}$）在 10%、20%、50%和 100%之间变化。而 δ_c 服从三参数威布尔分布。

$$F(\delta_c)=1-\exp\left\{-\frac{(\delta_c-\gamma_c)^{a_c}}{\beta_c}\right\}\qquad(9.1\text{-}60)$$

式中，$F(\delta_c)$为累积分布函数；a_c 为形状参数，且试验值取 δ_c 是 2，当试验值取 δ_m 时为 6；β_c 为尺寸参数；γ_c 为位置参数，根据实验定出，其值为 0.01 mm。

④ 分项系数 γ_a、γ_e 和 ϕ 的确定　为确定 $\bar{a}$、ε 和 δ_c 数据变化对结构失效概率（以 β 表示）的影响，预先设定目标可靠度指标为 β_0。并假定 μ_a、μ_e、COV（$\bar{a}$）和 COV（ε）保持不变，仅改变式中的尺寸参数 β_c，对应一个 β_c，就可通过 AFOSM 计算得到一个 β 值。改变 β_c 的初始值进行迭代运算，直到计算出一个 β 等于预设的 β_c。即 $\beta=\beta_0$，这意味着在失效面上找到一个满足 $Z=0$ 的点（δ_c^*、$\bar{a}^*$ 和 ε^*），如此定义分项安全系数如下：

$$\gamma_a=\bar{a}^*/\mu_a\qquad \gamma_e=\bar{\varepsilon}^*/\mu_e\qquad \phi=\delta_c^*/\bar{\delta_c}$$

注意式中的 $\bar{\delta_c}$ 是最少由三个 δ_c 试验测定的 δ_c 分布均值。

JWES 通过数据计算证明，γ_a、γ_e 和 ϕ 基本与 $\bar{a}$ 和 ε 均值无关，而主要取决于 $\bar{a}$ 和 ε 的变异参数，表为 JWES 计算得到在不同的 β 值，不同变异系数 COV（$\bar{a}$）和 COV（ε）时的分项安全系数，表 9.1-18～表 9.1-20 和图 9.1-87 示出各分项系数与 β 关系实例。

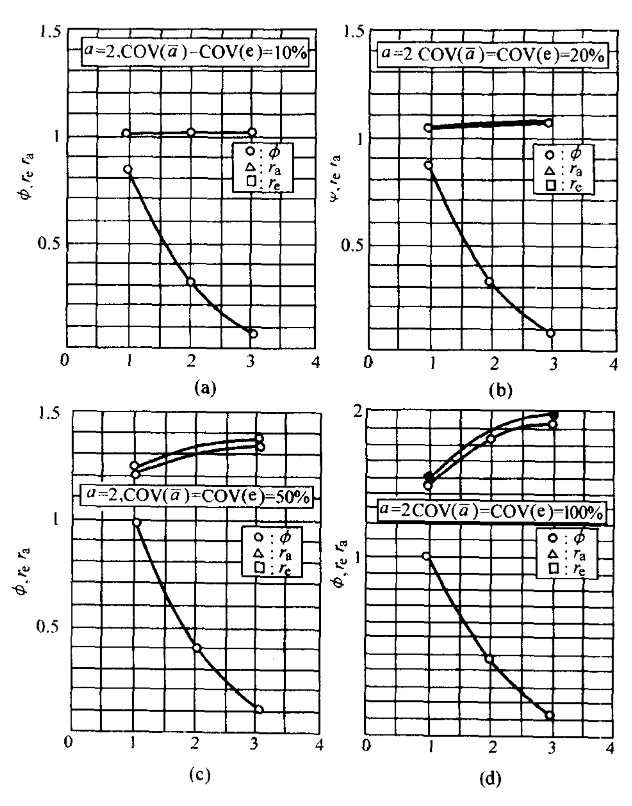


图 9.1-87　分项系数与可靠度指标 β 之间的关系

由这些表格和图形即可定出保持给出的可靠度值时［见公式 $\phi\delta_c > \delta(\gamma_a\bar{a}, \gamma_e\varepsilon)$］的分项系数值。

3.2.4　结构完整性评定方法 - SINTAP

（1）概述

SINTAP 是欧洲共同体国家多个研究机关及大学合作进行的安全评定研究项目，并得到欧洲共同体的资助，其目的是开发统一评定标准，使其得到实际应用。进行研究的机构为英国钢铁、英国能源、壳牌油气公司、化学公司（EXXON）、安全保险例如卫生及安全 Excutive。研究机构有法国 GKSS、法国焊接研究所、英国焊接研究所（WM、VTT、JRC）、Cantabria 和 Gent 大学以及软件开发（如海洋计算中心）和顾问机构等单位。

在 SINTAP 评定程序中，采用两种方法进行评定即 FAD 法和 CDF 方法，如图 9.1-88 所示。

两种方法的基础是当结构承受载荷未超出采用断裂力学标准和塑性极限分析确定的最大承载能力时，结构不会失效。在断裂力学分析中，需把裂纹尖端的载荷（经常称作裂纹驱动力）与材料抗断裂能力（定义为材料的断裂韧度或断裂阻力）相比较，确定结构是否失效。在大多数情况下，裂纹尖端载荷必须用弹 - 塑性概念评定，且它主要依赖于结构形式、裂纹尺寸和形状、材料的抗拉强度和载荷。在 FAD 方法中，裂纹尖端驱动力不但与材料断裂韧度比较，而且该驱动力还应与极限塑性载荷相比较，二者应同时进行和完成，而在 CDF 中，画出裂纹驱动力，并直接与材料断裂韧度相比较，再单独地进行塑性极限分析。

（2）级别

SINTAP 标准各级别的评定要求总结于表 9.1-21 中，其中包括零级别和三个标准级别及三个先进级别。

由表 9.1-21 可见，本标准除零级别外，共有三个标准级别、三个先进级别（其中包括用于管道和压力容器等承压构件的先泄后断分析），在三个标准级别的 FAD 和 CDF 分析中 $f(L_r)$ 不同，其特点主要由材料拉伸数据控制，换句话说，在级别 1 和级别 2 的评定中，由于不知道材料的应力 - 应变关系曲线，因而对材料性能做了保守估计，而在第 3 级别中由于知道了应力 - 应变关系曲线，即此时应具有应力 - 应变关系的细节和考虑了焊缝匹配影响，因而可得到精确的评定结果，三个标准级别的评定流程图如 9.1-89 所示。

表 9.1-18　分项系数值（$\beta = 1$）

		COV（$\bar{a}$）							
		10%		20%		50%		100%	
COV（ε）	10%	$\alpha_c = 2$ $\phi = 0.83$ $\gamma_e = 1.01$ $\gamma_a = 1.01$	$\alpha_c = 6$ $\phi = 1.00$ $\gamma_e = 1.04$ $\gamma_a = 1.03$	$\alpha_c = 2$ $\phi = 0.84$ $\gamma_e = 1.01$ $\gamma_a = 1.05$	$\alpha_c = 6$ $\phi = 1.03$ $\gamma_e = 1.03$ $\gamma_a = 1.11$	$\alpha_c = 2$ $\phi = 0.90$ $\gamma_e = 1.01$ $\gamma_a = 1.23$	$\alpha_c = 6$ $\phi = 1.09$ $\gamma_e = 1.03$ $\gamma_a = 1.41$	$\alpha_c = 2$ $\phi = 0.98$ $\gamma_e = 1.01$ $\gamma_a = 1.63$	$\alpha_c = 6$ $\phi = 1.12$ $\gamma_e = 1.02$ $\gamma_a = 1.91$
	20%	$\alpha_c = 2$ $\phi = 0.85$ $\gamma_e = 1.05$ $\gamma_a = 1.01$	$\alpha_c = 6$ $\phi = 1.03$ $\gamma_e = 1.12$ $\gamma_a = 1.03$	$\alpha_c = 2$ $\phi = 0.86$ $\gamma_e = 1.05$ $\gamma_a = 1.05$	$\alpha_c = 6$ $\phi = 1.05$ $\gamma_e = 1.11$ $\gamma_a = 1.10$	$\alpha_c = 2$ $\phi = 0.91$ $\gamma_e = 1.05$ $\gamma_a = 1.23$	$\alpha_c = 6$ $\phi = 1.10$ $\gamma_e = 1.09$ $\gamma_a = 1.38$	$\alpha_c = 2$ $\phi = 0.99$ $\gamma_e = 1.04$ $\gamma_a = 1.62$	$\alpha_c = 6$ $\phi = 1.13$ $\gamma_e = 1.07$ $\gamma_a = 1.87$
	50%	$\alpha_c = 2$ $\phi = 0.91$ $\gamma_e = 1.25$ $\gamma_a = 1.01$	$\alpha_c = 6$ $\phi = 1.10$ $\gamma_e = 1.42$ $\gamma_a = 1.02$	$\alpha_c = 2$ $\phi = 0.92$ $\gamma_e = 1.24$ $\gamma_a = 1.04$	$\alpha_c = 6$ $\phi = 1.10$ $\gamma_e = 1.40$ $\gamma_a = 1.08$	$\alpha_c = 2$ $\phi = 0.97$ $\gamma_e = 1.23$ $\gamma_a = 1.21$	$\alpha_c = 6$ $\phi = 1.13$ $\gamma_e = 1.34$ $\gamma_a = 1.32$	$\alpha_c = 2$ $\phi = 1.04$ $\gamma_e = 1.22$ $\gamma_a = 1.59$	$\alpha_c = 6$ $\phi = 1.15$ $\gamma_e = 1.29$ $\gamma_a = 1.77$
	100%	$\alpha_c = 2$ $\phi = 0.99$ $\gamma_e = 1.66$ $\gamma_a = 1.01$	$\alpha_c = 6$ $\phi = 1.13$ $\gamma_e = 1.92$ $\gamma_a = 1.02$	$\alpha_c = 2$ $\phi = 1.00$ $\gamma_e = 1.65$ $\gamma_a = 1.04$	$\alpha_c = 6$ $\phi = 1.13$ $\gamma_e = 1.89$ $\gamma_a = 1.06$	$\alpha_c = 2$ $\phi = 1.05$ $\gamma_e = 1.62$ $\gamma_a = 1.19$	$\alpha_c = 6$ $\phi = 1.15$ $\gamma_e = 1.80$ $\gamma_a = 1.26$	$\alpha_c = 2$ $\phi = 1.11$ $\gamma_e = 1.58$ $\gamma_a = 1.55$	$\alpha_c = 6$ $\phi = 1.16$ $\gamma_e = 1.71$ $\gamma_a = 1.66$

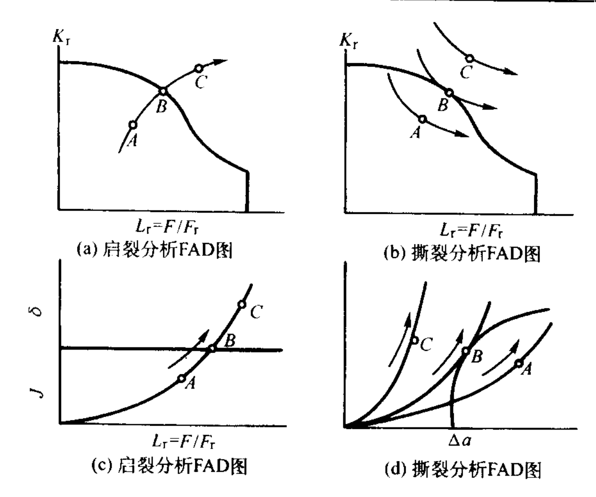


表 9.1-19　分项系数值（$\beta=2$）

		COV（$\bar{a}$）							
		10%		20%		50%		100%	
COV（ε）	10%	$\alpha_c=2$ $\phi=0.31$ $\gamma_e=1.02$ $\gamma_a=1.02$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.73$ $\gamma_e=1.05$ $\gamma_a=1.05$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.32$ $\gamma_e=1.02$ $\gamma_a=1.06$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.77$ $\gamma_e=1.05$ $\gamma_a=1.17$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.34$ $\gamma_e=1.02$ $\gamma_a=1.32$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.86$ $\gamma_e=1.05$ $\gamma_a=1.67$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.38$ $\gamma_e=1.02$ $\gamma_a=1.88$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.92$ $\gamma_e=1.04$ $\gamma_a=2.56$
	20%	$\alpha_c=2$ $\phi=0.32$ $\gamma_e=1.07$ $\gamma_a=1.02$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.78$ $\gamma_e=1.19$ $\gamma_a=1.05$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.32$ $\gamma_e=1.07$ $\gamma_a=1.06$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.81$ $\gamma_e=1.18$ $\gamma_a=1.16$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.35$ $\gamma_e=1.07$ $\gamma_a=1.32$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.89$ $\gamma_e=1.16$ $\gamma_a=1.65$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.39$ $\gamma_e=1.07$ $\gamma_a=1.88$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.95$ $\gamma_e=1.15$ $\gamma_a=2.51$
	50%	$\alpha_c=2$ $\phi=0.35$ $\gamma_e=1.35$ $\gamma_a=1.02$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.87$ $\gamma_e=1.70$ $\gamma_a=1.04$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.36$ $\gamma_e=1.35$ $\gamma_a=1.06$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.89$ $\gamma_e=1.68$ $\gamma_a=1.15$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.39$ $\gamma_e=1.34$ $\gamma_a=1.31$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.96$ $\gamma_e=1.62$ $\gamma_a=1.58$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.43$ $\gamma_e=1.33$ $\gamma_a=1.87$	$\alpha_c=6$ $\phi=1.00$ $\gamma_e=1.58$ $\gamma_a=2.38$
	100%	$\alpha_c=2$ $\phi=0.39$ $\gamma_e=1.91$ $\gamma_a=1.02$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.93$ $\gamma_e=2.60$ $\gamma_a=1.04$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.40$ $\gamma_e=1.93$ $\gamma_a=1.06$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.95$ $\gamma_e=2.56$ $\gamma_a=1.13$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.43$ $\gamma_e=1.92$ $\gamma_a=1.30$	$\alpha_c=6$ $\phi=1.00$ $\gamma_e=2.44$ $\gamma_a=1.54$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.48$ $\gamma_e=1.89$ $\gamma_a=1.84$	$\alpha_c=6$ $\phi=1.03$ $\gamma_e=2.33$ $\gamma_a=2.30$

表 9.1-20　分项系数值（$\beta=3$）

		COV（$\bar{a}$）							
		10%		20%		50%		100%	
COV（ε）	10%	$\alpha_c=2$ $\phi=0.88$ $\gamma_e=1.02$ $\gamma_a=1.02$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.44$ $\gamma_e=1.06$ $\gamma_a=1.05$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.08$ $\gamma_e=1.02$ $\gamma_a=1.07$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.49$ $\gamma_e=1.06$ $\gamma_a=1.19$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.09$ $\gamma_e=1.02$ $\gamma_a=1.35$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.56$ $\gamma_e=1.06$ $\gamma_a=1.77$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.09$ $\gamma_e=1.02$ $\gamma_a=1.93$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.61$ $\gamma_e=1.06$ $\gamma_a=2.85$
	20%	$\alpha_c=2$ $\phi=0.08$ $\gamma_e=1.08$ $\gamma_a=1.02$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.49$ $\gamma_e=1.21$ $\gamma_a=1.05$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.08$ $\gamma_e=1.08$ $\gamma_a=1.07$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.52$ $\gamma_e=1.20$ $\gamma_a=1.18$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.09$ $\gamma_e=1.08$ $\gamma_a=1.35$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.59$ $\gamma_e=1.20$ $\gamma_a=1.76$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.10$ $\gamma_e=1.08$ $\gamma_a=1.93$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.65$ $\gamma_e=1.20$ $\gamma_a=2.82$
	50%	$\alpha_c=2$ $\phi=0.09$ $\gamma_e=1.38$ $\gamma_a=1.02$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.56$ $\gamma_e=1.81$ $\gamma_a=1.05$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.09$ $\gamma_e=1.38$ $\gamma_a=1.07$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.59$ $\gamma_e=1.80$ $\gamma_a=1.18$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.10$ $\gamma_e=1.38$ $\gamma_a=1.34$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.67$ $\gamma_e=1.78$ $\gamma_a=1.74$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.11$ $\gamma_e=1.37$ $\gamma_a=1.92$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.72$ $\gamma_e=1.75$ $\gamma_a=2.78$
	100%	$\alpha_c=2$ $\phi=0.10$ $\gamma_e=2.00$ $\gamma_a=1.02$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.62$ $\gamma_e=2.90$ $\gamma_a=1.05$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.10$ $\gamma_e=1.99$ $\gamma_a=1.07$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.65$ $\gamma_e=2.87$ $\gamma_a=1.18$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.11$ $\gamma_e=1.97$ $\gamma_a=1.34$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.72$ $\gamma_e=2.84$ $\gamma_a=1.71$	$\alpha_c=2$ $\phi=0.12$ $\gamma_e=1.99$ $\gamma_a=1.93$	$\alpha_c=6$ $\phi=0.78$ $\gamma_e=2.77$ $\gamma_a=2.74$



(a) 启裂分析FAD图　(b) 撕裂分析FAD图　(c) 启裂分析FAD图　(d) 撕裂分析FAD图

图 9.1-88　启裂和延性撕裂分析的 FAD 和 CDF 法
A = 安全情况；B = 临界情况；
C = 不安全情况

（3）SINTAP 失效评定图方程

1）零级别　在 SINTAP 评定程序中，零级别（Default）是 FAD 和 CDF 两种最保守的评定方法。对于连续硬化材料（即无屈服平台材料）其表达式为：

$$f(L_r)=\left[1+\frac{1}{2}L_r^2\right]^{-1/2}\times[0.3+0.7\exp(-\mu L_r^6)] \tag{9.1-61}$$

对于具有屈服平台材料，其表达式为：

$$f(L_r)=\left[1+\frac{1}{2}L_r^2\right]^{-1/2} \tag{9.1-62}$$

式中，$L_r=P/P_S$，P_S 为屈服载荷。

$\left[1+\frac{1}{2}L_r^2\right]^{-1/2}$ 的物理概念是用它表征线弹性性能非常好的材料当考虑裂纹尖端屈服时的失效线，而第 2 项 $[0.3+0.7\exp(-\mu L_r^6)]$ 表征当材料性能偏离线弹性而由它的弹性区建立的安全区的丧失，这主要在 $L_r=1$ 区间出现（即达到屈服时）。



A6

表 9.1-21 根据拉伸数据选择评定级别

级别		所需数据	何时采用
零级别		屈服强度或流动（proof）强度	无其他拉伸数据可提供时
标准级别	级别1：基本级别	屈服强度或流动（proof）强度以及抗拉强度	要求快速得出结果，强度非匹配低于10%
	级别2：匹配级别	屈服强度或流动（proof）强度以及抗拉强度，匹配极限载荷	考虑焊缝和母材的屈服强度匹配影响，当屈服强度非匹配性超过10%时应用
	级别3：限定应力－应变	全部应力－应变关系曲线	较高精确度，比级别1和级别2保守性小，并包括了焊缝的非匹配性
先进级别	级别4：考虑拘束度评定	评定与含裂纹结构拘束度相当裂纹尖端拘束条件下的断裂韧度	考虑薄截面拘束度的降低或 Predominantly 拉伸载荷
	级别5：J积分分析	需要裂纹体的数值分析	—
	级别6：特殊场合的先泄后断分析	—	应用于管道和压力容器元件

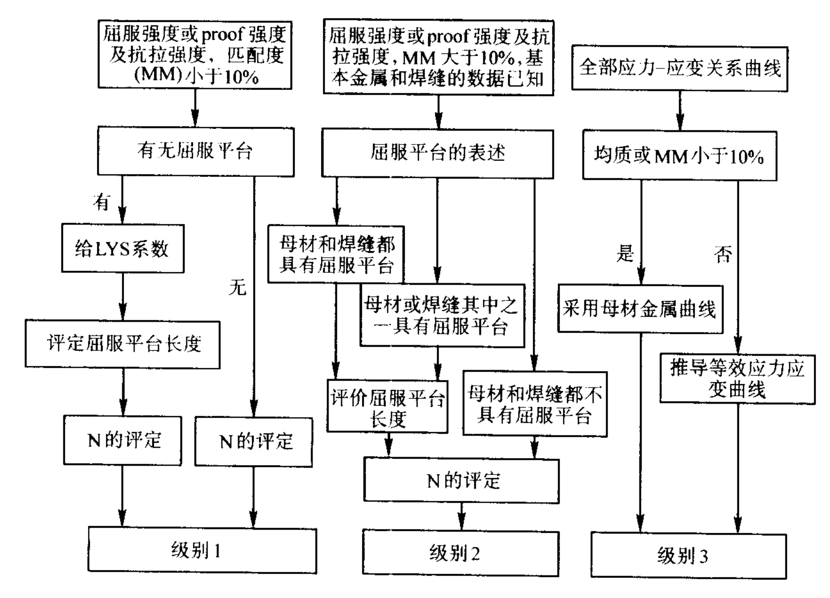


图 9.1-89 级别选择流程图

建议，最好在具有抗拉强度和屈服强度数据时，进行标准级别中基本级别的分析。在零级评定中，无论对于连续硬化材料还是具有屈服平台的材料按上述两式评定时，断裂线最大到 $L_r=1$ 为止。

2）级别1

① 对于具有屈服平台材料

对于 $0\leqslant L_r<1$，$f(L_r)=\left(1+\frac{1}{2}L_r^2\right)^{-1/2}$ (9.1-63)

对于 $L_r=1$，$f(L_r=1)=\left(\lambda+\frac{1}{2\lambda}\right)^{-1/2}$

式中 $\lambda=1+\frac{E\Delta\varepsilon}{\sigma_{YS}}$

对于 $1\leqslant L_r<L_r^{max}$，$f(L_r)=f(L_r=1)\times L_r^{(N-1)/2N}$

如果 $\Delta\varepsilon$ 为未知，则 $\Delta\varepsilon$ 可由 empirical 矫正推导获得较保守值

$$\Delta\varepsilon=0.0375\left(1-\frac{\sigma_{YS}}{1\ 000}\right)$$

而应变硬化指数由屈服强度和抗拉强度数据获得

$$N=0.3\left(1-\frac{\sigma_{YS}}{\sigma_b}\right)$$

塑性失稳极限由下式得到：

$$L_r^{max}=\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_{YS}+\sigma_b}{\sigma_b}\right)$$

② 对于连续屈服材料 $f(L_r)$ 由下式给出：

对 $0\leqslant L_r\leqslant1$，

$$f(L_r)=\left[1+\frac{1}{2}L_r^2\right]^{-1/2}\times[0.3+0.7\exp(-\mu L_r^6)] \quad (9.1\text{-}64)$$

式中 $\mu=\min\begin{bmatrix}0.001E/\sigma_{0.2}\\0.6\end{bmatrix}$

对 $1\leqslant L_r<L_r^{max}$，$f(L_r)=f(L_r=1)\times L_r^{(N-1)/2N}$

N 和 L_r^{max} 由以上二式给出。

3）级别2

① 当母材和焊缝金属两者均为连续屈服时（无屈服平台）

对 $0\leqslant L_r\leqslant1$，

$$f(L_r)=\left[1+\frac{1}{2}L_r^2\right]^{-1/2}\times[0.3+0.7\exp(-\mu_M L_r^6)] \quad (9.1\text{-}65)$$

对 $1<L_r\leqslant L_r^{max}$，$f(L_r)=f(L_{r=1})L_r^{(N_M-1)/2N_M}$

对 $L_r>L_r^{max}$，$f(L_r)=0$

2

式中

$$\mu_M = \min\left[\frac{(M-1)}{(F_S^M/F_S^B-1)/\mu_W+(M-F_S^M/F_S^B)/\mu_B}, 0.6\right] \quad (9.1\text{-}66)$$

$$\mu_W = [0.001E_W/\sigma_S^W, 0.6] \quad \mu_B = [0.001E_B/\sigma_S^B, 0.6] \quad (9.1\text{-}67)$$

$$N_M = \frac{(M-1)}{(F_S^M/F_S^B-1)N_W+(M-F_S^M/F_S^B)/N_B} \quad (9.1\text{-}68)$$

$$N_W = 0.3(1-\sigma_S^W/\sigma_U^W) \quad N_B = 0.3(1-\sigma_S^B/\sigma_U^B) \quad (9.1\text{-}69)$$

$$L_r^{max} = \frac{1}{2}\left(1+\frac{0.3}{0.3-N_M}\right) \quad (9.1\text{-}70)$$

② 当母材和焊缝金属均具有屈服平台时

对 $0 \leqslant L_r < 1$　$f(L_r) = (1+L_r^2/2)^{-1/2}$　(9.1-71)

$L_r = 1$　$f(L_r) = (\lambda_M + 1/(2\lambda_M))^{-1/2}$

$1 < L_r \leqslant L_r^{max}$　$f(L_r) = f(L_r=1)L_r^{(N_M-1)/2N_M}$

$L_r > L_r^{max}$　$f(L_r) = 0$

式中　$$\lambda_M = \frac{(F_S^M/F_S^B-1)\lambda_W+(M-F_S^M/F_S^B)\lambda_B}{(M-1)} \quad (9.1\text{-}72)$$

$$\lambda_W = 1+0.0375\left(\frac{E_W}{\sigma_S^W}\right)\left(1-\frac{\sigma_S^W}{1\,000}\right)$$

$$\lambda_B = 1+0.0375\left(\frac{E_B}{\sigma_S^B}\right)\left(1-\frac{\sigma_S^B}{1\,000}\right) \quad (9.1\text{-}73)$$

N_M 和 L_r^{max} 的计算同式（9.1-68）～式（9.1-70）。

③ 当母材和焊缝其中之一具有屈服平台时　当 $0 \leqslant L_r < 1$，采用式（9.1-65）进行计算，对于具有屈服平台的材料，μ 值取 0。例如，如果母材具有屈服平台，则：

$$\mu_M = \min\left[\frac{(M-1)}{(F_S^M/F_S^B-1)/\mu_W}, 0.6\right],$$
$$\mu_W = [0.001E_W/\sigma_S^W, 0.6] \quad (9.1\text{-}74)$$

当 $L_r = 1$ 时，$f(L_r)$的表达式是不连续的，采用式（9.1-71）进行计算，对于连续屈服的材料，λ 值取 0。例如，如果母材具有屈服平台，则：

$$f(L_r=1) = (\lambda_M + 1/(2\lambda_M))^{-1/2} \quad (9.1\text{-}75)$$

$$\lambda_M = \frac{(M-F_S^M/F_S^B)\lambda_B}{(M-1)}, \lambda_B = 1+0.0375\left(\frac{E_B}{\sigma_S^B}\right)\left(1-\frac{\sigma_S^B}{1\,000}\right) \quad (9.1\text{-}76)$$

当 $1 < L_r \leqslant L_r^{max}$ 时，$f(L_r) = f(L_r=1)L_r^{(N_M-1)/2N_M}$。

L_r^{max} 的计算同式（9.1-70）。

4）级别 3　在知道应力－应变关系曲线时，采用此级别进行评定：

对于 $L_r < L_r^{max}$，

$$f(L_r) = \left[\frac{E\varepsilon_{ref}}{L_r YS}+\frac{L_r^3 YS}{2E\varepsilon_{ref}}\right]^{-1/2} = \left[\frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}}+\frac{L_r^2\sigma_{ref}}{2E\varepsilon_{ref}}\right]^{-1/2} \quad (9.1\text{-}77)$$

对于 $L_r > L_r^{max}$，$f(L_r) = 0$

5）先进级别　第 4～6 级别中 FAD/CDF 方法中均需考虑拘束度，在第 4 级别中需进行有限元计算，第 5 级别中需进行 J 积分计算，而第 6 级别则需考虑元件先泄后断的结果。

因此提高分析精度有两种路线：其一是修正失效线，其基础建立在具有更多的力学性能而扩大安全区，其二是基于断裂韧度值考虑（如考虑撕裂性能来达到结果）。

（4）在结构完整性评定中韧度数据的处理

1）韧度的选择　针对每个级别有两种断裂韧度：一是表征启裂（韧性或脆性）；二是韧性撕裂。表 9.1-22 给出选择应用何种韧度的指南。

表 9.1-22　韧度选择和处理

所需参量	断裂形式特点	数据的输入
启裂 启裂的断裂韧度由三个或更多的试样测定	脆性断裂起始或韧性断裂发生	启裂或最大载荷下的特征值
撕裂 断裂韧度的韧性撕裂函数由三个或更多的试样测定	阻力曲线	以裂纹韧性增长为函数的特征值
零级别 夏比冲击能量	所有形式	换算后的特征值

2）采用夏比试样冲击能量换算断裂韧度　SINTAP 程序中夏比试样冲击能量换算断裂韧度的特点是在一条转变温度曲线上的不同部位不能用单一的关系式来表达，其原则如下。

① 对于韧－脆转变温度的下平台区，取下包络线。

② 在韧－脆转变温度区间用统计方法进行分析。

③ 在韧－脆转变温度的上平台区，取下包络线。

对于在脆性区间工作的材料，由夏比数据测定断裂韧度要遵循"master curve"概念，此概念建立在夏比冲击 28 J 温度和 $K_{mat} = 10\ \text{MPa}\cdot\sqrt{m}$ 时的温度之间的关系上，然后此关系又在考虑所需的失效概率、厚度影响、断裂韧度转变曲线的形状后再进行修正，具体的换算公式为 $K_{mat} = \left[12\sqrt{C_V}-20\left(\frac{25}{B}\right)^{0.25}\right]+20$，式中 K_{mat} 单位为 $\text{MPa}\cdot\sqrt{m}$，C_V 单位为 J。断裂韧度转变曲线在转变区间，采用 95% 置信度时，由下式表述：

$$K_{mat} = 20\{11+77\exp[0.019(T-T_{28J}-3℃)]\}(25/B)^{1/4}\times[\ln(1/(1-P_f))]^{1/4} \quad (9.1\text{-}78)$$

式中，T 为设计温度，℃；T_{28J} 为 28 J（或 27 J）夏比转变温度，℃；B 为试样厚度或裂纹长度 $2c$，mm；P_f 为失效概率和标准方差为 13℃。

在夏比冲击能量为 28 J 时，当降低 5% 断裂韧度值和置信度为 90% 时，可简化上述公式，此简化公式表征保守的断裂韧度下限值：

$$K_{mat25} = 12\sqrt{C_V} \quad (9.1\text{-}79)$$

式中，K_{mat25} 为材料厚度为 25 mm 或裂纹长度为 25 mm 时的断裂韧度值，$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$；$C_V$ 为夏比缺口冲击韧性值，J。当没有 28 J 冲击能的相应数据时，允许采用数值不大的插值法。

目前，尚无与上平台区等效的 Master 曲线，因此只能采用确定性方法，关系如下式所示：

$$K_{mat} = 17C_V + 1\,740 \quad (9.1\text{-}80)$$

式中，K_{mat} 或 $K_{J0.2}$ 单位为 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$，$C_V$ 单位为 J。

有关评定应用程序见图 9.1-90。

3）断裂韧度数据的处理　由于价格或材料数量的限制，经常根据有限数目试样的试验数据确定断裂韧度，但是从该有限数据决定合适的统计分布，往往带有随意性，因而是不可靠的。但如果以按三参数威布尔分布的最薄弱链方法来处理数据，则可消除和避免这种不可靠性，对于铁素体钢，可按下式处理：

$$P(K_C) = 1-\exp\left[-\left(\frac{K_C-20}{K_0-20}\right)^{-4}\right] \quad (9.1\text{-}81)$$

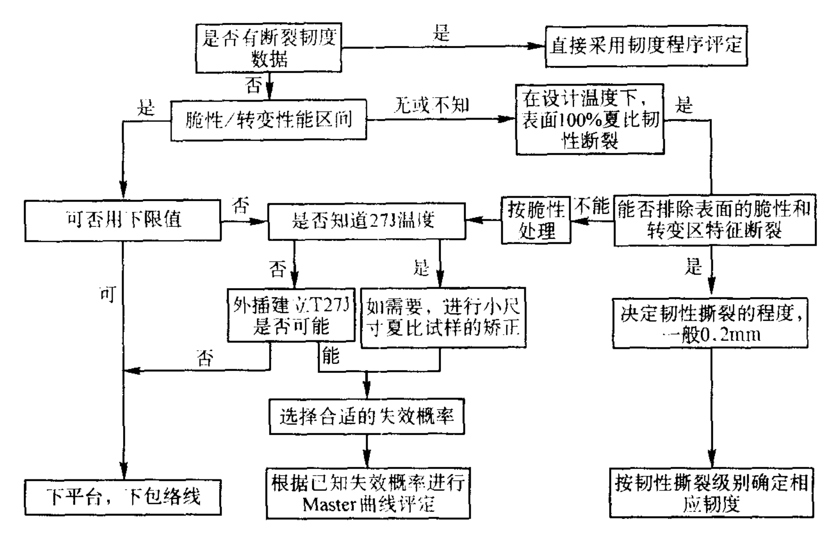


图 9.1-90　夏比数据处理流程图

式中，$P(K_C)$为断裂韧度累积概率；K_C 为单个试样的断裂韧度，$MPa\cdot m^{1/2}$；K_0 为尺寸参数（分布63%的值）；20 为威布尔分布的转换参数；4 为威布尔分布中小范围屈服时的形状参数。

显然，当 K_0 已知时，可将上式改变成：

$$K_C = 20 + (K_0 - 20)\{-\ln[1 - P(K_C)]\}^{-0.25} \quad (9.1\text{-}82)$$

并用此式确定具有一定可靠度的 K_C 值。

根据最大或然率（Maximum likelihood）方法确定 K_0。

校核所有数据是否符合相关试验标准的验收条件，对于断裂韧度应取 $MPa\cdot\sqrt{m}$，如果是 CTOD 应按下式将其转换成 K_C 值，$K_C = \left[\dfrac{1.5CTODE}{(1-v^2)}\right]^{0.5}$，然后由下式确定 K_{Climit} 值：

$$K_{Climit} = (Eb_0 Y_S/30)^{0.5} \quad (9.1\text{-}83)$$

式中，Y_S 为屈服应力；b_0 为试样缺口下面的原始韧带尺寸，m。

式（9.1-83）保证断裂是在小范围屈服下发生的。如果试验结果超出这一极限值，则将此数据删掉（censor），最后将测出的断裂韧度值转换成 25 mm 厚度时的 K_{c25}。

K_0 可按下式获得：

$$K_0 = 20 + \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(K_{c25i} - 20)^4}{\sum_{i=1}^{N}\delta_i}\right]^{0.25} \quad (9.1\text{-}84)$$

式中，N 为试验结果的数量；i 为第 i 次试验结果；δ 为对不合格被删除的数据，$\delta=0$；而合格的试验结果 $\delta=1$。

如此，将式（9.1-84）结果代入式（9.1-82），即可计算出 K_C，得到具有一定概率的断裂韧度值。

（5）残余应力

在 SINTAP 程序中对焊态、修复态以及热处理态对残余应力的影响进行了详尽的研究。分为已知焊接工艺和焊接工艺不知两种情况，提出在符合表 9.1-23 范围规定时，对于不知焊接条件的残余应力按下式计算。

对于焊态：横向残余应力取为母材或焊缝二者屈服强度的最小值，纵向残余应力取为母材或焊缝二者屈服强度的最大值；修复状态残余应力取母材或焊缝二者屈服强度的最大值。

对于热处理状态：残余应力取值较低，其最大值为焊缝金属屈服强度的10%，在安全评定中，对于弹－塑性状态下由于塑性造成的残余应力的释放，在 SINTAP 程序中，采用下述公式进行计算，即

表 9.1-23　有效的参数范围

接头形式	厚度/mm	热输入/kJ·mm⁻¹	屈服强度/MPa
平板对接接头	24～300	1.6～4.9	310～740
管对接接头	9～84	0.35～1.9	225～780
管缝焊接头	50～85	—	345～780
T形对接接头	25～100	1.4	376～421
管和平板接头	25～50	0.6～2.0	360～490
修复焊缝	75～152	1.2～1.6	500～590

$$K_r = (K_I^P + VK_I^S)/K_{mat} \quad (9.1\text{-}85)$$

V 可根据 V/V_0 比值由图 9.1-91 定出。

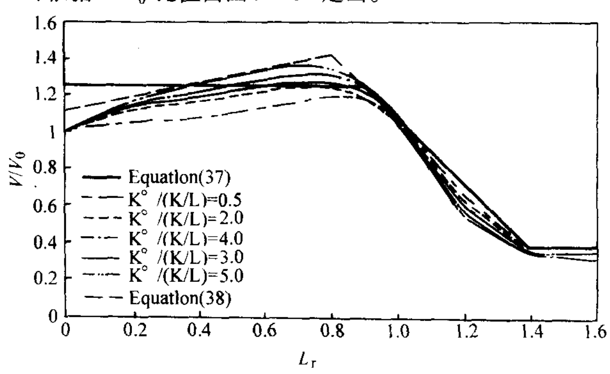


图 9.1-91　V/V_0 的预测

V_0 为初始作用为零时的 V 值，即仅由二次应力作用时的 V 值。

$$V_0 = \sqrt{\frac{E}{(1-v^2)}J_S}/K_I^S \quad (9.1\text{-}86)$$

式中，J_S 为二次应力产生的 J 积分值。

图 9.1-91 中，K_P^S 为二次载荷等效弹－塑性应力强度因子，其值为 $K_P^S = \sqrt{E'J^S}$，由图可见：

$$L_r \leqslant 0.9,\quad V/V_0 = 1.25; \quad (9.1\text{-}87)$$

$$0.9 < L_r \leqslant 1.4,\quad V/V_0 = 2.78 - 1.8L_r;$$

$$L_r > 1.4,\quad V/V_0 = 0.4$$

编写：霍立兴（天津大学）
张　莉（天津大学）
邓彩艳（天津大学）



第 2 章　焊接结构的疲劳与寿命

1　疲劳断裂过程及特性

疲劳断裂是焊接结构失效的一种主要形式，它发生在承受交变或波动应变的构件中。一般说来对应于该应变的最大应力要低于材料的抗拉强度，甚至低于材料的屈服点，因此断裂往往是无明显塑性变形的低应力断裂。

疲劳断裂一般由三个阶段组成：即疲劳裂纹的形成、裂纹扩展、剩余截面不能再承受施加载荷时构件发生断裂。可以说，这三个阶段之间没有严格界限，例如疲劳裂纹"产生"阶段的定义就带有一定的不确定性，这主要是因为不同研究领域采用不同的裂纹检测技术引起的。从研究疲劳机制出发，有人采用电子显微镜，把裂纹长大到 10^{-4} m（100 μm）之前定义为裂纹产生阶段，但从工程实用角度出发，则又可以把以低倍显微镜（×10）看到之前的裂纹定义为裂纹产生阶段。

同样"剩余截面不能再承受施加载荷"一般也根据结构的类型而定，例如对于承力构件，可以定义为扣除裂纹面积的净截面已不能再承受所施应力；而对于压力容器上述定义可视为是容器出现泄漏。

在实际工程中预测材料疲劳寿命是很复杂的。这是因为除了极少数的脆性材料以外，其他材料的疲劳寿命对结构的载荷条件、局部应力和材料的局部特性等参量的微小变化非常敏感，而考虑这些微小的变化在实际中又是非常困难的，这就造成在疲劳寿命的分析中具有很大的不确定性。因此要求设计者要具有对类似构件的分析经验。另外，虽然采用实验室内小型疲劳试验的数据难以精确地估计结构件的疲劳寿命，但这些数据还是相对地极其有用的。这是因为：实验室内的试验是疲劳失效标准的主要来源；它可最大限度地排除疲劳试验中载荷变化带来的影响；在估计不同材料相对抗疲劳性能上是有用的；在评定结构制造、表面加工精度、热处理、装配技巧和环境因素等对疲劳寿命影响上也是相当有用的。

在研究疲劳问题中，传统的方法是以造成疲劳裂纹产生和形成失效的裂纹扩展所需的整体应力循环次数来表达的，过去经常认为疲劳寿命主要决定于裂纹产生，而造成失效的疲劳裂纹扩展只占疲劳寿命的很少部分。但是随着裂纹检测技术的发展，发现裂纹的增大和扩展是决定疲劳寿命的主要因素。如果仔细地分析疲劳断口，可以看到在疲劳核心周围，存在着以疲劳核心为焦点的非常光滑、非常细洁、贝纹线不明显的狭小区域。这是由于疲劳裂纹在该区扩展速度很慢以及裂纹反复张开和闭合而使断面磨光的缘故。这个区域从本质上看已属于疲劳裂纹扩展区。

随着断裂力学的出现，疲劳数据已可通过裂纹扩展速率来表达和说明。

对于焊接接头，产生疲劳裂纹一般要比其他连接形式的循环次数少，这是因为焊接接头中不仅有应力集中（如角焊缝，对接焊缝的焊趾处），而且在这些部位也易产生缺陷，同时存在焊接残余应力。大量研究表明，在接头焊趾处也存在有微小的非金属夹渣。这些因素的综合作用，使得在焊接接头的疲劳寿命中，疲劳裂纹产生阶段只占整个疲劳过程中的一段相当短的时间，而主要时间属于裂纹扩展。

可把典型的疲劳失效断裂表面分成三个区域：疲劳核心区，疲劳裂纹扩展区和瞬时破坏区。它们分别表征着疲劳寿命中的三个过程。

第一阶段：对应于裂纹产生，第一区域不大，最多为 2～5 个晶粒范围。在每个晶粒中，其断裂表面是沿着一定晶面进行的（注意不要与解理面相混淆），即当疲劳裂纹的核心一旦在试样表面滑移带或缺陷处晶界上形成后，立即沿滑移带的主滑移面向金属内部扩展，此滑移面的走向大致与正应力呈 45°交角。当裂纹遇到晶界时，其位向稍有偏离，但就裂纹的宏观平面的总体来说，仍保持与应力轴呈 45°交角。换句话说，第一阶段裂纹总是沿着最大切应力方向的滑移面扩展，在某些情况下，第一阶段的表面很难辨认。

第二阶段：裂纹依第一阶段方式扩展一定距离后将改变方向，沿与正应力相垂直的方向扩展，此时正应力对裂纹的扩展将产生重大影响。图 9.2-1 是疲劳失效寿命中第一阶段和第二段的示意图。

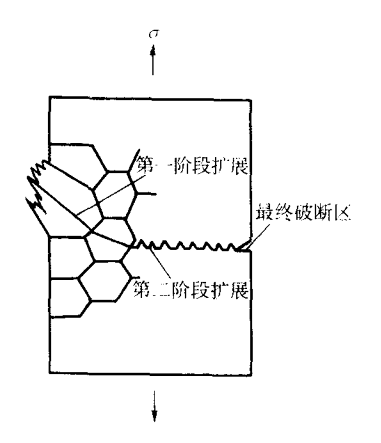


图 9.2-1　疲劳裂纹扩展示意图

第三阶段：为最后断裂阶段，它是由超载造成的，断口可能是脆性的，也可以是延性的，也可以二者兼而有之。

疲劳裂纹扩展区是疲劳失效断口上最重要的特征区域。常呈现海滩波纹状，有时又称贝纹状、蛤壳状等。它是疲劳裂纹扩展过程中所留下的痕迹，往往是疲劳失效分析最主要的鉴证。其特点是该波纹状的推进线一般是从裂纹核心开始的，然后向四周推进呈弧形线条，因此它垂直于裂纹扩展方向。发生海滩状波纹常常是由于载荷（如停机或开机）或频率变化的结果，也可以是断裂表面停机期间氧化的结果。

应当说明，对于低周疲劳失效观察不到此种海滩波纹，在实验室进行恒应力恒应变试验时，或疲劳断裂是由裂纹不间断地扩展但载荷无变化的场合也不显示该海滩波纹，这一点在失效分析中应当充分注意。

最终断裂区的断口特征与静载拉伸的断口特征相似，在试样的边缘常有剪切唇出现。对于非常脆的材料，该区亦常为结晶状的脆性断口。对于较薄的试样，裂纹从疲劳裂纹区扩展至此，断裂平面将围绕裂纹扩展方向的轴线产生平面转动，并与载荷方向呈 45°角，呈一单一剪切平面或双向剪切断裂表面，如图 9.2-2 所示。

关于疲劳断口的微观形貌，首先应当指出，疲劳裂纹扩展路线是穿晶的，采用电子显微镜对疲劳断裂表面进行观察可以发现，疲劳裂纹的最主要的断口特征是辉纹，它们是一系列基本上相互平行的条纹、略带弯曲呈波浪形。同时，在断口两侧断面上疲劳辉纹应当基本对应。

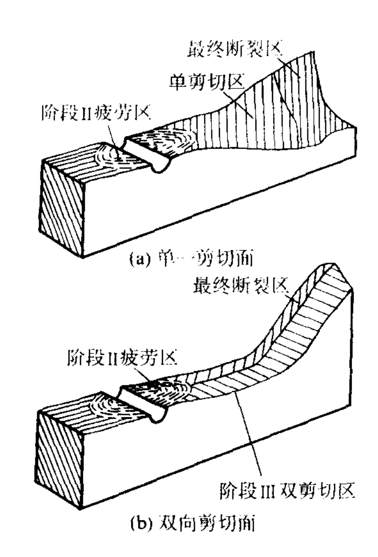


图 9.2-2 与载荷成 45°角的剪切表面

疲劳辉纹垂直于裂纹扩展方向，每一条辉纹是一次应力循环留印的结果。但是应当说明，相反每一次应力循环并不一定产生辉纹。辉纹的间距依赖于施加载荷的水平或应力强度因子的幅值。辉纹的清晰度与材料的韧度有关。韧度较好的材料辉纹较为清晰。当应力高于疲劳极限值时，辉纹最易出现。因此在高强钢中，疲劳辉纹将不如在铝合金中清晰。

另外，研究观察也表明，当裂纹扩展速率较高时，辉纹变宽；当在裂纹尖端产生较大的塑性变形时，常导致大量的二次裂纹产生，这种二次疲劳裂纹将和主疲劳裂纹一样，发生扩展而形成辉纹，但其方向往往与裂纹总体扩展方向不尽一致。

有各种假说和理论来解释辉纹形成机制。其中较为著名的有 Laird 和 Smith 塑性钝化模型，如图 9.2-3 所示。未加载荷时裂纹形态如图 9.2-3a 所示，加载段在张应力的作用下，裂纹张开，裂纹尖端两个小切口使滑移集中于与裂纹平面成45°角的滑移带上，两个滑移带相互垂直，如图 9.2-3b 所示。当张应力达到最大值时，如图 9.2-3c，裂纹因变形使应力集中的效应消失，裂纹尖端的滑移带变宽，裂纹前端钝化，呈半圆状，在此过程中产生新的表面并使裂纹向前扩展。此后转入去载后半周期，沿滑移带向相反方向滑移（图 9.2-3d）。裂纹前端相互挤压，在加载半周期中形成的新表面被压向裂纹平面，其中一部分发生折迭而形成新的切口（图 9.2-3e），结果造成一个新的疲劳纹，其间距为 c，即为辉纹宽度。该理论认为每经过一次循环加载，裂纹尖端即经历一次锐化－钝化－再锐化的过程；裂纹扩展一段距离，断口表面上就产生一道辉纹。

2 疲劳载荷

在焊接结构的疲劳设计中要充分考虑可能作用于所设计构件上的各类形式的载荷，如施加载荷，构件自身质量、雪重、风载、波浪、压力、加速度的作用、超载、振动以及动态响应等。还需指出温度瞬时变化的作用同样要予以考虑。大量经验证明对疲劳载荷考虑不周是焊接构件疲劳损伤的重要原因之一。

从另一个角度讲，焊接残余应力将会改变构件的抗疲劳断裂性能和加载效果。因此在确立焊接构件的抗疲劳断裂性能和分析载荷作用结果时要予以充分考虑。

2.1 应力循环特性与应力幅的概念及其相互的关系

（1）$S-N$ 曲线及应力循环特性

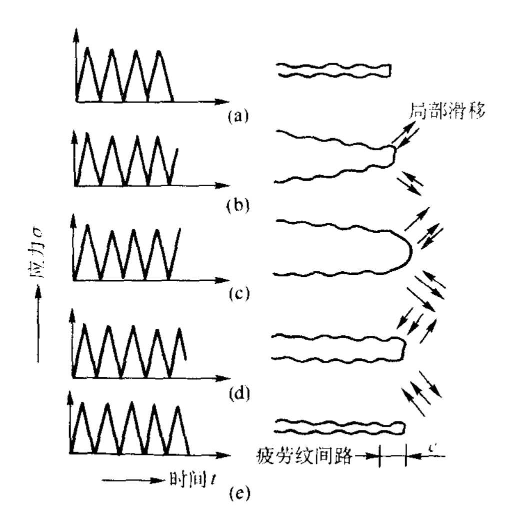


图 9.2-3 疲劳裂纹的扩展机制示例

1）$S-N$ 曲线　在金属构件的实际应用中，如果载荷的数值和（或）方向变化频繁时，即使载荷的数值比静载时的抗拉强度 σ_b 小得多，甚至比材料的屈服点 σ_s 低得多，构件仍然可能破坏。

对试样用不同载荷进行多次反复加载试验，即可测得在不同载荷下使试样破坏所需的加载循环次数 N。将破坏应力与 N 绘成如图 9.2-4 所示的曲线，即为 Wöhler 疲劳曲线，这条疲劳曲线随着循环次数 N 的增大而降低，当 N 很大时曲线趋于水平。曲线上对应于某一循环次数 N 的破坏应力即为该循环次数下的疲劳强度，曲线的水平渐近线即为疲劳极限。

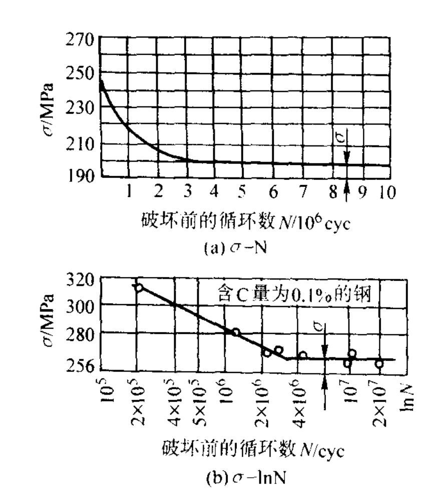


图 9.2-4 疲劳曲线

如果把图 9.2-4a 中的横坐标改为载荷循环次数 N 的对数，或循环应力与循环次数均取为对数坐标，则金属破坏应力与循环次数之间的关系曲线可用两条直线表示，如图 9.2-4b 所示。水平线代表疲劳极限数值。但是应当说明的是：对于大多数非铁素体材料或具有应力集中的焊接接头试样，并不存有疲劳极限。即其 $S-N$ 曲线在高循环次数时仍以较慢的速率下降，此时常需采用疲劳强度值。因为此时没有标准的循环次数（如 2×10^6）对应要求，因此指明疲劳强度时应同时指出其所对应的循环次数。

疲劳试验结果往往不是都在一条单一的 $S-N$ 曲线上，而具有一定的分散带，这是试验本身特性所决定的。在一般情况下，施加应力减少时和应力集中影响减低时，分散度增加。根据大量的概率统计分析研究结果可认为金属材料的疲

劳寿命数据符合对数正态分布规律。或者说，如对每个疲劳寿命取对数，则这些数据符合正态分布。

图 9.2-5 为考虑概率分布的 $S-N$ 曲线即 $P-S-N$ 曲线，曲线 AB 是存活率为 50% 的疲劳曲线，也就是常规疲劳设计中给出的 $S-N$ 曲线；曲线 CD 是存活率为 99% 的疲劳曲线，与曲线 CD 对称的曲线 EF，其对应的存活率为 1%；曲线 GH 对应的存活率为 90%。

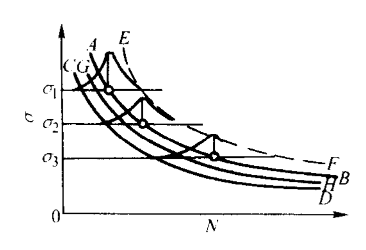


图 9.2-5　$P-S-N$ 曲线

曲线 EF 因存活率太低，不能用于疲劳强度设计，如用曲线 GH 作为结构件设计基准，则该构件在规定的使用条件下和规定的使用时期内不发生疲劳破坏的概率是 90%。如用曲线 CD 作为设计基准、则在上述要求下构件安全使用的概率是 99%。究竟是以曲线 GH 作为设计基准，还是以曲线 CD 作为设计基准，应根据可靠性要求、构件的重要性和经济性的要求综合考虑。

2）应力循环特性　绝大多数实验室内的疲劳试验是拉伸加载或弯曲加载，他们在试样内将仅引起拉伸应力或压缩应力。在每次循环加载内，有关的应力参量如下：

$$\sigma_m=\frac{\sigma_{max}+\sigma_{min}}{2}\qquad \sigma_a=\frac{\sigma_{max}-\sigma_{min}}{2}$$

式中，σ_{max} 为应力循环内的最大应力；σ_{min} 为应力循环内的最小应力；σ_m 为平均应力；σ_a 为应力振幅。

同时两个特征应力的比值称应力循环比，比较常用的比值有：

A ——应力振幅与平均应力比（$A=\sigma_a/\sigma_m$）；

r ——最小应力与最大应力之比（$r=\sigma_{min}/\sigma_{max}$）。其值在 $-1\sim+1$ 之间变动。具体地又可分为：

对称交变载荷：σ_{min}，$=-\sigma_{max}$，$r=-1$，其疲劳极限或疲劳强度用 σ_{-1} 表示（图 9.2-6a）。

脉动载荷：$\sigma_{min}=0$，$r=0$，其疲劳强度或疲劳极限用 σ_0 表示（图 9.2-6b）。

拉伸变载荷：σ_{min} 和 σ_{max} 均为拉伸应力，但大小不等，$0<r<1$，其疲劳强度或疲劳极限用 σ_r 表示，下标 r 用相应的特性系数表示，如 $\sigma_{0.3}$（图 9.2-6c）。

拉压变载荷：σ_{min} 为压应力，σ_{max} 为拉伸应力，二者不等，其疲劳强度或疲劳极限用 σ_{-r} 表示。

不难看出，$\sigma_{max}=\sigma_m+\sigma_a$；$\sigma_{min}=\sigma_m-\sigma_a$。因此可以把任何变动载荷看作是某个不变的平均应力（恒定应力部分）和应力振幅（交变应力部分）的组合。

3）焊接结构的疲劳强度常用表示法——疲劳图　$S-N$ 曲线是在一定的应力循环试验条件下测出的应力与循环次数的关系。为了方便应用可把各种不同的应力循环特性即应力与循环次数的关系绘于一张图表中，该图即称为疲劳图。

应用于焊接结构的常用疲劳图有下述两种。

① 以平均应力 σ_m 为横坐标，最大应力 σ_{max} 及最小应力 σ_{min} 为纵坐标的疲劳图，如图 9.2-7 所示。图中曲线 ADC 为最大应力 σ_{max} 线，曲线 BEC 为最小应力 σ_{min} 线，在 ADC 与 BEC

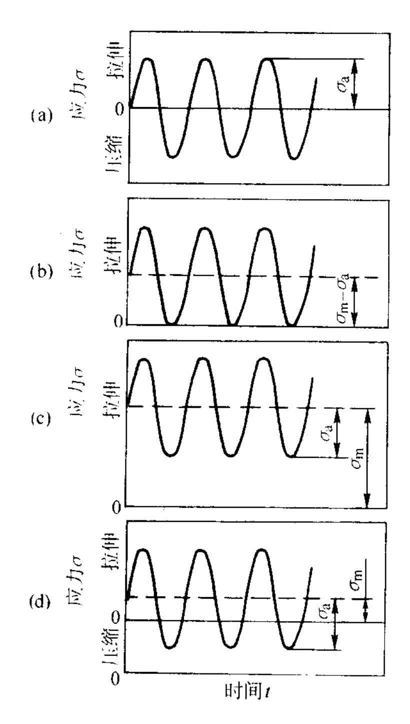


图 9.2-6　具有不同应力循环特征的变动载荷

所包围区域内的任意点，表示不产生疲劳破坏，在这区域以外的点，表示经一定的应力循环次数后要发生疲劳破坏。最大应力线 ADC 与最小应力线相交于 C 点，C 点表示的应力状态为最大应力等于最小应力，即为静载荷的破坏点，其纵坐标和横坐标都等于材料的抗拉强度 σ_b。最小应力线 BEC 与横坐标相交于 E 点，即 E 点对应的最小应力等于零。从 E 点作横坐标轴的垂直线，与最大应力线相交于 D 点，则 D 点的纵坐标值为脉动应力循环的疲劳极限 σ_0。纵坐标轴上的 A 点与 B 点位于原点 O 的上、下方，其平均应力值为 0，所以其纵坐标值为对称应力循环的疲劳极限 σ_{-1}。在该疲劳图上可以用作图法求出任何一种循环特性系数 r 下的疲劳强度，例如自 O 点作一与水平线成 α 角的直线，使

$$\tan\alpha=\frac{\sigma_{max}}{\sigma_m}=\frac{2\sigma_{max}}{\sigma_{max}+\sigma_{min}}=\frac{2}{1+r}$$

则直线与图形上部曲线的交点的纵坐标就是该循环特性下的疲劳强度 σ_r。

② 用 σ_{max} 和 σ_{min} 表示的疲劳图，如图 9.2-8 所示，图中的纵坐标表示应力循环中的最大应力 σ_{max}，而横坐标表示应力循环中的最小应力 σ_{min}，由原点出发的每条射线都代表一定的应力循环特性。例如由原点向左与横坐标倾斜 45° 的直线表示对称交变载荷，$r=\dfrac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}=-1$，它与曲线交于 B 点，

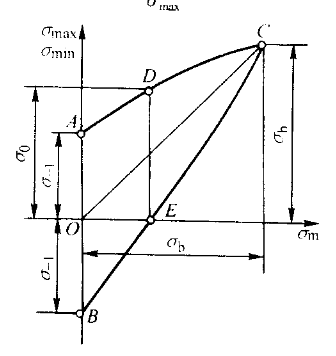


图 9.2-7　用 σ_{max} 和 σ_m 表示的疲劳图



BB'即为σ_{-1}；向右与横坐标倾斜45°的直线表示静载，它与曲线交于D点。DD'即为静载强度σ_b，而纵坐标本身（CC'）又表示脉动载荷$r=0$，CC'即为σ_0等。

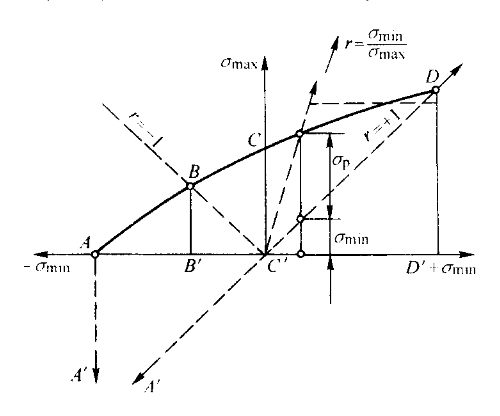


图9.2-8　用σ_{max}和σ_{min}表示的疲劳图

（2）应力范围概念及其在焊接结构疲劳强度研究中的作用

令

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

则$\Delta\sigma$定义为应力范围，显然$\Delta\sigma=2\Delta\sigma_a$，即应力范围为2倍的应力振幅。

最近20余年的分析研究表明，由于结构焊缝及其附近存有达到或接近屈服点的残余应力，因此在常幅施加应力循环作用的接头中，焊缝附近所承受的实际应力循环将是由材料的屈服应力（或接近屈服应力）向下摆动，而不管其原始作用的循环特征如何，如图9.2-9所示。例如标称应力循环为$+S_1 \sim -S_2$。则其应力范围为S_1+S_2。但接头中的实际应力循环范围将是由S_y（达到屈服点的应力振幅）$\sim S_y-(S_1+S_2)$。这一点在研究焊接接头疲劳强度时是非常重要的，它导致一些焊接结构疲劳强度设计规范以应力范围代替了循环特征r。

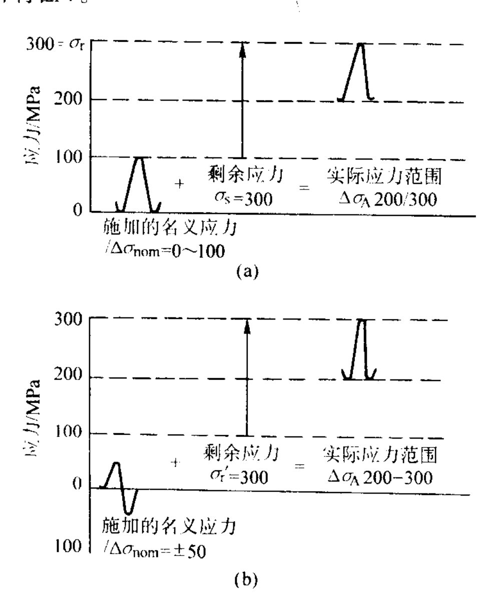


图9.2-9　焊接接头中标称和实际应力循环范围的关系

为了更清楚的叙述这一问题，可以举一数字例题说明之。若假定材料的屈服应力为300 MPa，承受脉动循环载荷$r=0$（图9.2-9a）其对应的应力范围为100 MPa，则其实际应力范围上限值为屈服应力300 MPa，下限为300－（100＋0）＝200 MPa，因此其实际应力范围为200～300 MPa。假如仍以相同材料为例，但承受交变载荷$r=-1$（图9.2-9b），其循环应力范围为±50 MPa，同样，其实际应力范围上限仍为300 MPa，下限为300－（50＋50）＝200 MPa，因此实际应力范围仍为200～300 MPa。这清楚地说明，实际应力范围和与其相关的疲劳循环次数，疲劳强度只与施加应力范围有关，而与最大、最小循环应力值以及应力循环特性无关，这一点很重要。这意味着焊接接头的疲劳性能只能用应力范围概念来表述。

图9.2-10是对焊接板梁和加盖板焊接板梁以应力范围与循环次数的双对数关系的表达的疲劳试验数据。如果以应力范围计作疲劳强度。则如图所示构件承受的最小应力值，进而最小应力与最大应力的比值即应力循环特性不影响构件的疲劳性能，即不影响应力范围－循环次数关系曲线。

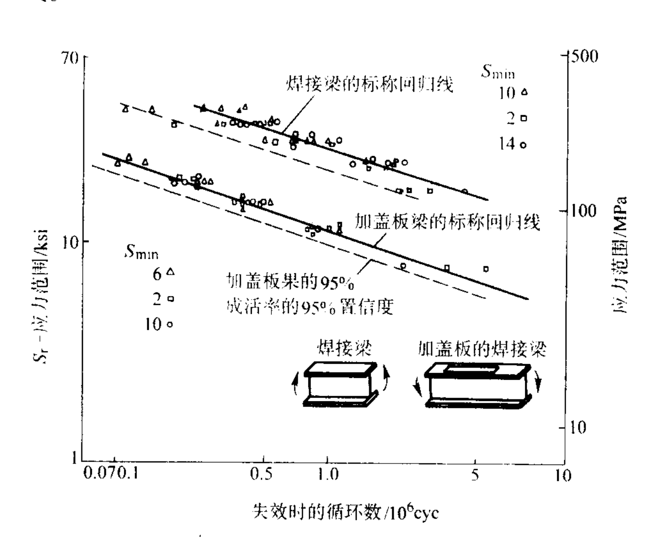


图9.2-10　焊接板梁的疲劳试验数据表达法

由图9.2-10可知N与应力范围之间的对数关系为：

$$\lg N = \lg A - B\lg S_r \tag{9.2-1}$$

如以指数关系表达，则

$$N = AS_r^{-B} \tag{9.2-2}$$

式中，N为断裂前的循环次数；S_r为标称应力范围；A为对已知构件为一常数；B为直线斜率，一般取为3。

应当指出，在没有焊接残余应力存在时，例如对于应力消除试样，假如在试样缺口尖端的应力也低于屈服点，即未产生塑性变形，则名义应力循环特征r同样也是实际应力循环特征，这时可以说应力循环特征r仍是决定试样（构件）疲劳强度的重要参量。

2.2　应力分类

根据ISO（国际标准局）的新版本，在疲劳设计和评定中，需把疲劳加载（fatigue action）和疲劳强度（fatigue resistance）清楚地区别。这意味着根据所提供的焊接接头资料首先确定需采用的合适的应力类别，并计算和测量出有关应力范围，然后再根据该应力类别选择相应的疲劳强度类别。将二者加以比较，如表9.2-1所示，表9.2-1a示出疲劳加载和疲劳强度类别。表9.2-1b示出各应力类别的构成和需采用的应力范围。

（1）标称应力

标称应力是在构件相关截面上计算出的平均应力，它不包括焊接接头结构细部（如焊缝形状）处所产生的应力集中，一般呈弹性应力性质。显然不同截面可能具有不同的标

表 9.2-1a　疲劳加载和疲劳强度类别

疲劳加载类别	疲劳强度类别
标称应力	以一组 $S-N$ 曲线表征出的结构中疲劳强度
几何应力	以一组 $S-N$ 曲线表征的抗几何应力的疲劳强度
等效缺口应力	以一条 $S-N$ 曲线表征的抗等效缺口应力的疲劳强度
裂纹尖端的应力强度因子	以裂纹扩展定律中材料参数表示的抗裂纹扩展力

称应力。例如在简支梁构件中，可用材料力学的简单公式计算出不同截面的平均应力即标称应力。对于焊接构件，则需计算焊件处的局部标称应力，此时，局部标称应力为不考虑焊件本身造成的任何应力集中时的焊件处的应力。它们往往与远离焊件处的标称应力不同，因而称局部标称应力。

但是需要注意，在标称应力计算中，应包括构件宏观几何形状和施力点附近处的应力。这是因为由于宏观几何状态和施力点处的应力可显著影响横截面的膜应力重新分布，且在反映接头疲劳强度的 $S-N$ 曲线中未予以考虑之故，如图 9.2-11、图 9.2-12 所示。

在标称应力计算中是否需要考虑焊接接头错位（轴向错位和角偏差）所产生的二次弯曲应力应视情况而定。这是因为在一些有关疲劳设计的文件中（如 IIW 文件）在建立疲劳强度的 $S-N$ 曲线时已考虑了一定的二次应力（如对横向对接焊缝，$K_t=1.3$，对于十字接头，$K_t=1.45$）。如设计中位错引起的二次弯曲应力值大于上述二次弯曲应力值（表 9.2-2）则应考虑该值的影响，否则，则不需考虑（$K_t=\sigma_b/\sigma_a$，式中 σ_b 为二次弯曲应力值，σ_a 为施加应力值）。

对于同时具有轴向和角偏差的接头，则需采用下式计算 K_t 以便考虑两种错位形成的二次弯曲应力。

$$K_t = 1 + (K_{t轴} - 1) + (K_{t角} - 1) \tag{9.2-3}$$

表 9.2-1b　各类应力的构成及所采用的应力范围

类　别	应　力　构　成	采用的应力范围	评定方法
A	采用常规力学方法如材料力学方法计算出的整体应力		
B	A + 由构件设计产生的宏观几何尺寸影响（包括施力点和接头错位影响）	标称应力范围（同样可能为局部标称应力范围）	标称应力方法
C	A + B + 由焊接接头的结构细部造成的结构非连续性	结构几何应力范围（热点应力范围）	几何应力（热点应力方法）
D	A + B + C + 由焊道形成的应力集中（如焊趾和焊根处的应力集中） a：实际缺口应力 b：等效缺口应力	弹性缺口应力（整体应力）范围	a：断裂力学方法 b：等效缺口应力方法

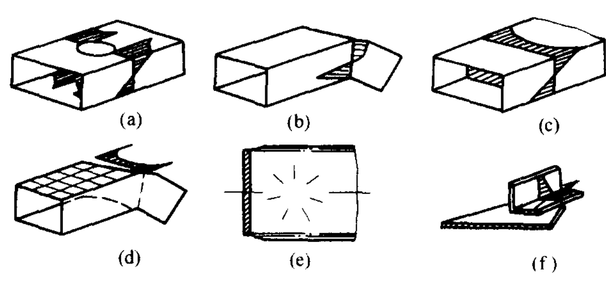
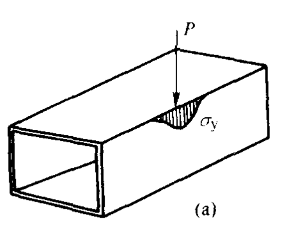


图 9.2-11　宏观几何尺寸的影响示例



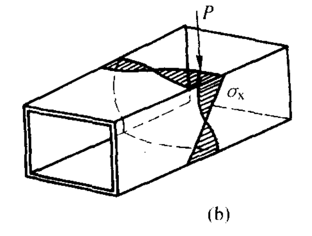


图 9.2-12　施力点处的局部标称应力

表 9.2-2　峰值弯曲应力计算公式

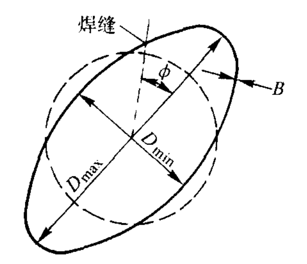
1）平板间的轴向错位	
计　算　式	示　意　图
$\dfrac{\sigma_{Fb}}{\sigma_m}=\lambda\times\dfrac{el_1}{B\,(l_1+l_2)}$ 式中，λ 为依赖于约束的系数，对于非约束情况 $\lambda=6$；对于无限远加载情况，假定 $l_1=l_2$	B，e，l_1，l_2
2）不同厚度平板间的轴向错位	
计　算　式	示　意　图
$\dfrac{\sigma_{F\cdot b}}{\sigma_m}=\dfrac{6e}{B_1}\times\dfrac{B_1^n}{B_1^n+B_2^n}$ 对于无限远处加载的非约束接头 $n=1.5$	e，B_1，B_2 $B_2 \geqslant B_1$

续表 9.2-2

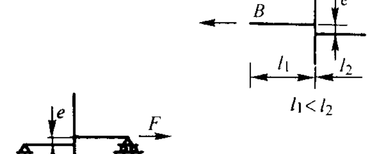
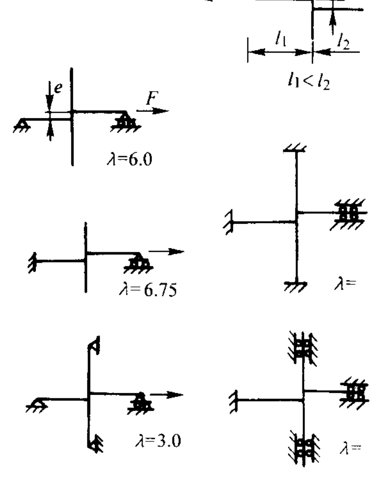
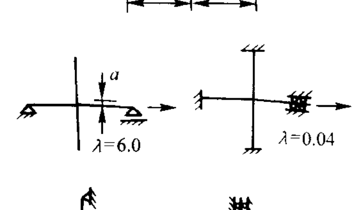
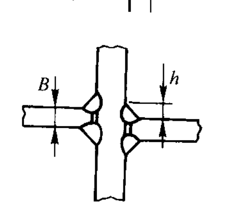
3）不同厚度筒形壳体中接头轴向错位	
计 算 式	示 意 图
$\frac{\sigma_{F\cdot b}}{\sigma_m}=\frac{6e}{B_1(1-v^2)}\times\frac{B_1^n}{B_1^n+B_2^n}$ 对于环向接头或球形容器接头 $n=1.5$； 对于纵向接头 $n=0.6$	$B_2\geqslant B_1$

4）平板间的角变形（错位）	
计 算 式	示 意 图
假定边界条件相当于刚性固定端边 $\frac{\sigma_{F\cdot b}}{\sigma_m}=\frac{3y}{B}\times\frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\frac{\beta}{2}}$ 或 $\frac{\sigma_{F\cdot b}}{\sigma_m}=\frac{3\alpha\times 2l}{B}\times\frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\frac{\beta}{2}}$ 式中 $\beta=\frac{2l}{B}\sqrt{\frac{3\sigma_m}{E}}$，$\alpha$ 为弧度 假如边界条件相当于铰接固定的端边 $\frac{\sigma_{F\cdot b}}{\sigma_m}=\frac{6y}{B}\times\frac{\tanh(\beta)}{\beta}$ $\frac{\sigma_{F\cdot b}}{\sigma_m}=\frac{3\alpha\times 2l}{2B}\times\frac{\tanh(\beta)}{\beta}$ 式中 tan$h$ 校正是考虑到由于接头承受拉伸载荷有使角变形变小的趋势，它永远小于 L、因此为了简化计算，可不考虑。只有当与轴向错位联合作用时角度变形分量有减少整体应力效应时才考虑。另外当 $2l/B<10$ 时，此校正的效应可以忽略；和当 $2l/B>100$ 时，将不考虑边界条件	

5）圆筒壳体中纵向接头的角度错位	
计 算 式	示 意 图
假定边界条件为刚性固定 $\frac{\sigma_{F\cdot b}}{\sigma_m}=\frac{3d}{B(1-v^2)}\times\frac{\tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\frac{\beta}{2}}$ 式中 $\beta=\frac{2l}{B}\sqrt{\frac{3(1-v^2)\sigma_m}{E}}$ 假定是理想形状 $d=y/2$ 或 $\alpha l/2$，α 为弧度 假定边界条件为铰接 $\frac{\sigma_{F\cdot b}}{\sigma_m}=\frac{6d}{B(1-v^2)}\times\frac{\tanh(\beta)}{\beta}$	

6）承压筒形管道或壳体的椭圆度	
计 算 式	示 意 图
$\frac{\sigma_{F\cdot b}}{\sigma_m}=\frac{1.5D(D_{max}-D_{min})\cos(2\phi)}{B\left[1+\frac{0.5P_m(1-v^2)}{E}\times\left(\frac{D}{B}\right)^3\right]}$ 式中，D 为名义直径；D_{min} 为最小直径；D_{max} 为最大直径；P_{max} 为工作状态的最大应力，该式考虑了焊接接头的确切位置，和加压时管道和壳体形状有益的变化，假如在疲劳载荷下 P_m 发生变化，取其工作期间的平均值，此时较保守的评定式为： $\frac{\sigma_{F\cdot b}}{\sigma_m}=\frac{1.5(D_{max}-D_{min})}{B}$	

续表 9.2-2

十字接头中由错边引起的峰值弯曲应力	
1）对接和角接接头的轴向错边	
计 算 式	示 意 图
在焊缝焊趾处产生疲劳裂纹后在板内扩展 $$\frac{\sigma_{F\cdot b}}{\sigma_m}=\lambda\frac{el_1}{B(l_1+l_2)}$$ 式中，λ 为与约束等有关的系数。对于非约束和远处加载情况：$l_1=l_2$ 和 $\lambda=6$	 
2）对接和角接接头的角度变形情况	
计 算 式	示 意 图
属于在焊缝焊趾处产生疲劳裂纹后在板内扩展情况 $$\frac{\sigma_{F\cdot b}}{m}=\lambda\times\frac{al_1l_2}{B(l_1+l_2)}$$ 式中，λ 依赖于约束等的因素：（见示意）	 
3）角接接头中的角度变形	
计 算 式	示 意 图
属于在焊缝焊趾处产生疲劳裂纹后在焊肉内扩展情况 $$\frac{\sigma_{F\cdot b}}{\sigma_w}=\frac{e}{B+h}$$ 式中，σ_w 焊缝喉部（或称焊缝最大截面高度）（throat）的施加应力范围	

（2）结构几何应力

结构几何应力为包括除焊缝形状本身所产生的应力集中而外的焊接元件细部所产生的所有应力集中的应力，它一般作用在焊趾处，也称作热点应力，其组成如表 9.2-2 的 C 所示。这意味着由局部缺口如焊趾所引起的非线性峰值应力在几何应力组成中不予考虑，几何应力将只依赖于构件接头处的宏观尺寸和载荷参量。

在板件、壳体和管道结构中经常要产生结构几何应力



σ_{ger}，可将其分为膜应力 σ_{mem} 和壳体弯曲应力 σ_{ben} 两部分。由于它们包括了结构非连续性的应力集中影响。因此在一般情况下，它们高出标称应力。

在疲劳设计和评定中，一般要在疲劳裂纹起源点处即在焊接接头的极限部位即热点处确定结构几何应力。图 9.2-13 示出了几个非连续性结构元件的几何应力分布范例。

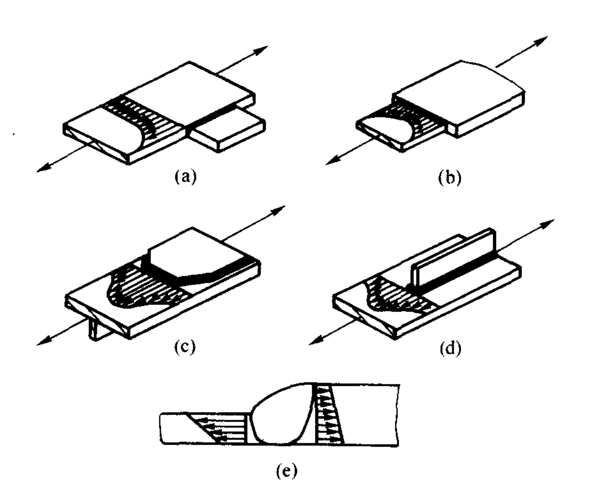


图 9.2-13 结构元件及其几何应力

目前用几何应力范围评定管结构的疲劳性能已得到广泛应用。对于形状复杂难以明确地定出标称应力的焊接接头，或在表 9.2-7 中未有相应接头类型时建议采用几何应力进行评定。例如对图 9.2-14 所示桥梁元件，其疲劳寿命用大型试验进行了确定，如果用标称应力范围进行表示，其分散性很大，很难给出精确的 $S-N$ 曲线图（见图 9.2-15a），而采用几何应力范围后，其分散性明显减少。因而可对几类结构元件形式给出一条 $S-N$ 曲线，见图 9.2-15b。

一般来说，难以用分析方法确定结构元件的非连续性，进而难以确定它的几何应力。目前多采用有限元计算法或应变比实际测量法求解结构几何应力。但是应用几何应力范围时，不同研究者得到的疲劳数据相差较大，这是因为不同研究者采用不同的有限元网格划分，或不同的试验途径造成的（有些研究者把应变片贴得尽量靠近焊趾处，而其他人则把距焊趾一定距离的应变片上测定的应变数值来外推焊趾处应力。）因此国际焊接学会有关文件对几何应力计算和测试作了一些规定。

一般来讲在下述情况下推荐采用结构应力方法。

① 焊接接头由于其复杂的形状影响难以清楚的确定标称应力。

② 结构的非连续性与经典的结构元件无可比性。另外，此处定义的结构应力方法只限于评定焊趾，而不能评定裂纹起始于焊根处沿焊缝扩展造成的失效，如图 9.2-16f ~ i 的情况，热点应力只限于应用于图 9.2-16a ~ e。

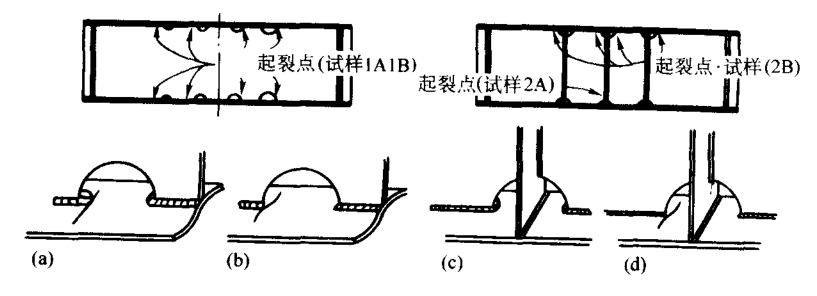
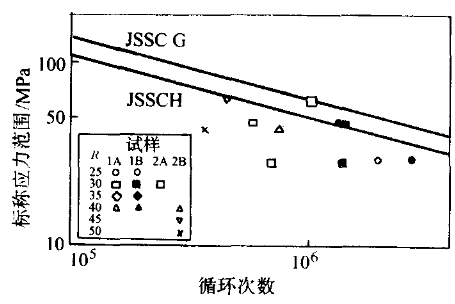
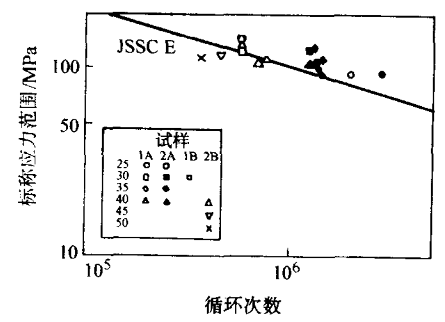


图 9.2-14 钢梁元件有关细部



(a) 用标称应力范围评定钢梁元件结果



(b) 用几何应力范围评定钢梁元件结果

图 9.2-15 钢梁元件评定结果

③ 热点应力方法不能应用到承受纵向应力的连续焊缝，因为对于此类焊缝，标称应力方法已经足够。

1）结构应力类别　除上述给出的结构应力定义外，按照它们在板材上的部位和相对于焊趾的方位，结构应力可分为三种类型，如表 9.2-3 和图 9.2-17 所示。

2）结构应力的确定　可以测量和计算结构应力，对于这两种方法，外推方法基本上是一致的，即首先在设定点处测定其应力，再通过外推法测定结构应力。

可以采用距焊趾一定距离处的三个应力值或应变值测定结构应力。选择靠近焊趾处的最高点测试时，应避免焊缝本身造成的缺口影响（它导致非线性应力的峰值），焊趾处结构应力是通过外推得到的。

结构的最大结构应力点（热点应力）可以通过下述方法得出。

① 测定几处结构应力，比较得出热点应力。

② 通过有限元计算结果进行分析。

③ 根据现有断裂构件的经验确定。

④ 结构应力的计算　一般说来，采用分析结构和元件不连续性及细部的方法来得到结构应力是不可能的，因为很少有参数公式可以应用，因此一般采用有限元方法来计算结构应力。

通常情况下，计算结构应力是建立在理想的、平直的焊接接头基础上的，因此任何可能的不平度（角变形）在建立有限元模型或应力增大系数 K_m 时均应予以考虑，特别是对



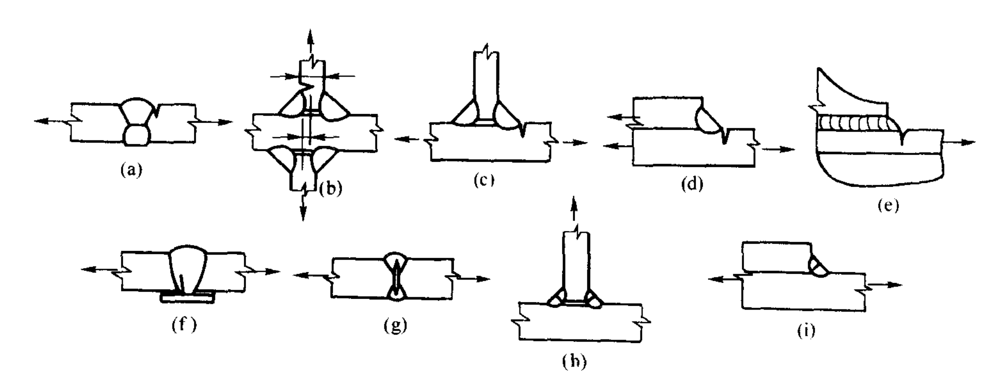


图9.2-16 焊接接头不同的裂纹扩展位置

表9.2-3 结构应力类型

类型	特征	确定
1	结构应力垂直平板表面上的焊趾	特殊的有限元分析程序或测量及外推
2	结构应力垂直板边缘的焊趾	
3	结构应力平行焊趾	等同于标称应力

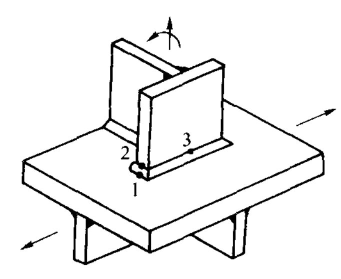


图9.2-17 结构应力类型

于对接焊缝，十字接头和横向角焊缝更需注意。

有限元模型范围应当如此选取，即结构元件上的边界影响应当最小，合理的边界条件能以公式来表达。

薄板、壳体和实体单元皆可应用。需要说明的是，一方面单元的排列和类型应当考虑陡降的应力梯度和所形成的板弯曲，另一方面沿板厚方向，根据结构应力定义应考虑成线性分布，同时在与应变片测量点相当的部位处计算应力。

在板和薄壳单元的模型中，单元应安排在结构元件的中心平面上。推荐采用8节点单元，特别是对于陡降应力梯度时更应采用之。在简化的模型中除非结构受局部弯曲影响，例如相邻焊缝之间距离较小而外一般不考虑焊缝，此时焊缝可以包括在立板或具足够刚性的斜板单元中，或者为了平衡节点位移而引入拘束方程或刚性“环”(link)。

对于较为复杂情况，例如采用实体单元时，需考虑陡降应力梯度和板弯曲以及沿截面厚度线性应力分布情况下的位移函数，这可以由等参20节点单元（在边缘处具有中间节点）来实现。此时在板厚度方向只安排一个单元，膜应力和弯曲应力分量采用降低积分序列（reduced integration order）亦很容易获得，此时建模时建议考虑焊缝，如图9.2-18所示。

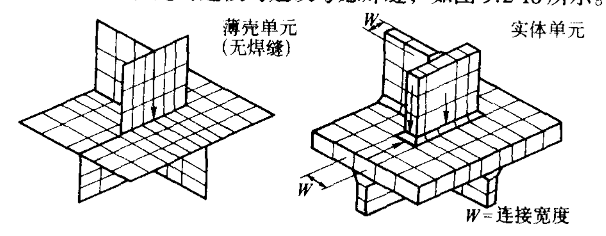


图9.2-18 考虑焊缝细节的典型网格及应力评估路线

单元的长度由应力外推点来决定，为了避免应力奇异性的影响，靠近热点处的应力经常由第一个或第二个节点处计算，这意味着热点处的单元长度至少对应于第一个应力外推点处的距离，可以采用较粗的网格。但应予以充分的注意。

特别地，对于陡降应力梯度情况，采用合适的单元宽度是及其重要的。对于图9.2-13a、b，单元的宽度应与单元长度相对应，而对于情况图9.2-13d，附件前方的实体单元或两个壳单元的宽度不应当超过附件宽度“w”，即附件厚度加上两个焊脚长度（同样示于图9.2-18中）。应当避免过于弯曲的单元。

一般情况下，结构应力分量需在板表面或边缘处进行评定，然后外推到热点处，典型的外推路线在图9.2-18中由箭头示出。如果焊缝处没有建模，推荐外推应力到构件相交点处，以避免未考虑焊缝刚度所引发的应力过低的评定。

3）结构应力测量

①“a”型热点 图9.2-19示出在a型热点附近，沿板厚方向应力分布是如何变化的。在距焊趾$0.4t$距离处，非线性分量实际上已然消失，分布接近于线性，这一事实在结构热点应力近似的外推技术中加以利用。

在大多数a型热点中，结构应力和变形在逼近焊趾处接近于直接上升，在用应变片测定热点应力时，采用图9.2-19所示线性外推已然足够，将两个应变片A和B粘贴于距焊趾$0.4t$和$1.0t$处，然后采用线性外推得到热点处的结构应变。

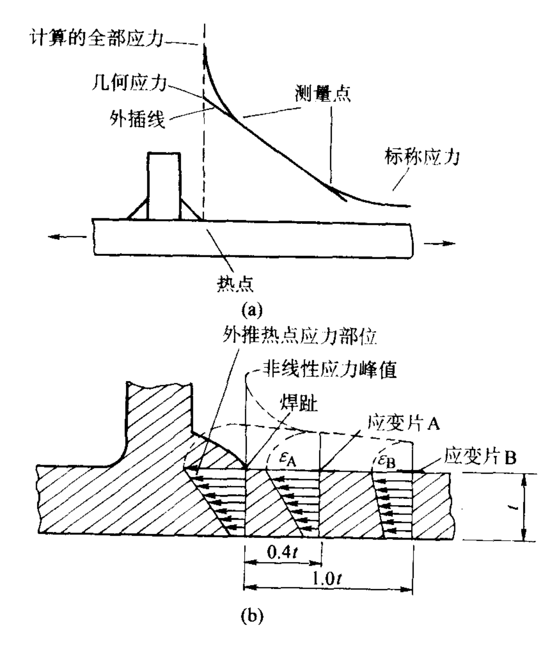


图9.2-19 结构应力和应变的测量

应变片的位置应能导致合理外推到极限点处，第一个应变片的中心位置应位于距焊趾 $0.4t$ 处，应变片长度应不超出 $0.2t$，假如板材太薄，难以满足此项要求，应变片导线端应当位于距焊趾 $0.3t$ 处。

推荐应用下述外推程序和应变片数量。

a）膜应力为主要应力的情况下，采用两个应变片和线性外推法。

$$\varepsilon_{struc} = 1.67\varepsilon_a - 0.67\varepsilon_b \qquad (9.2\text{-}4)$$

b）当由大直径管道或平板中的偏心附加件引发壳体弯曲应力时，采用3个应变片和二次外推法。

$$\varepsilon_{struc} = 2.52\varepsilon_a - 2.24\varepsilon_b + 0.72\varepsilon_c \qquad (9.2\text{-}5)$$

如果应力状态接近于单向应力，则结构热点应力可近似的由式（9.2-6）得到：

$$\sigma_{struc} = E\varepsilon_{struc} \qquad (9.2\text{-}6)$$

但是应力状态多为双向的，则实际应力比由式（9.2-6）导出的值高出10%，如果要求精度较高，推荐采用应变，有时采用有限元结果也能得出纵向与横向应力的比值 $\varepsilon_y/\varepsilon_x$，则结构应力 σ_{struc} 也可由式（9.2-7）得出（假定主应力垂直于焊趾）：

$$\sigma_{struc} = E\varepsilon_x \frac{1 + v\dfrac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}}{1 - v^2} \qquad (9.2\text{-}7)$$

代替实际应变值，测量应变幅值 $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}$，代入上式后可以得到结构应力幅值。

对于管接头，同样推荐采用两个应变片的线性外推，此处测量简单的单轴应力已然足够。

②“b”型热点　此处给出近似的方法，b型应变片粘贴于板边缘距焊趾4 mm、8 mm和12 mm处，应变所对应的热点应力可通过二次外推到焊趾处得出。

4）应力集中系数和参量公式的应用　对于多种圆形截面管道的接头，已建立了参量公式来求以结构应力表征的应力集中系数 k_{struc}，此处结构应力 σ_{struc} 为

$$\sigma_{struc} = k_{struc}\sigma_{nom}$$

此处 σ_{nom} 为弦杆中标称轴向膜应力

（3）等效缺口应力

等效缺口应力是在假定材料为线弹性情况下推算出的缺口根部的整体应力，考虑统计特性及焊缝形状参量的分散性和缺口根部非线性的材料性质，用一个有效值代替实际的焊缝形状，即对于结构钢已然证明有效缺口根部半径为1 mm时，可得到一个不变的结果，在进行疲劳评定时，将有效缺口应力与一条疲劳强度曲线相比较。

此方法只限应用于失效始于焊趾或焊根的焊接接头，其他情况的疲劳失效，例如从表面鱼鳞或埋藏缺陷起始的疲劳失效并不能采用此方法。同样下列情况下也不能应用此方法，即主要应力成分平行于焊缝或平行于根部间隙。

此方法方便地适用于各种焊缝几何形状的比较，除非另有说明，建议对于对接焊缝，焊缝侧角为30°，而对于角焊缝为45°。

在名义缺口根部半径几何尺寸能确定时，例如采用了一定的焊后改善疲劳强度的方法，则将此几何半径尺寸加1 mm应用于有效缺口应力分析。

此方法只应用于板厚 $t > 25$ mm 的情况。

1）等效缺口应力的计算　有效缺口应力或应力集中系数可通过取自图表的参量公式来计算或采用有限元方法或边界单元法来计算。

推荐有效缺口半径尖端与实际缺口根部例如非焊接缺口间隙端部相接触。

2）等效缺口应力的测量　因为有效缺口半径为理论值（认为是1 mm），因此在焊接构件中不能直接测量有效缺口应力，但是此单一的有效缺口可用在树脂中进行光弹应力测量。

2.3　应力强度因子方法

实际构件在加工制造和使用过程中，由于各种原因（如焊接、锻造、表面划痕等）往往存在着各种类型的缺陷。带有缺陷的构件，在变载荷的作用下，缺陷可能逐渐扩展。应用断裂力学把疲劳设计建立在构件本身存有缺陷这一客观事实的基础上，按照裂纹在循环载荷下的扩展规律，估算结构的寿命是保证构件安全工作的重要途径，同时也是对传统疲劳试验分析方法的一个重要补充和发展。

此时，裂纹扩展性能以应力强度因子范围 ΔK 表征。断裂力学计算需建立在缺口根部也就是焊趾处整体应力基础上，对于不同焊接结构元件，已经建立了结构元件非线性应力峰值和局部缺口影响的校正函数，采用这些校正函数，断裂力学分析就能建立在结构应力或名义应力之上。校正函数公式可以建立在不同的应力类型之上，此校正函数和应力类型需要相对应。

可以通过参量公式计算应力强度因子。首先，在假定没有裂纹的情况下，该裂纹部位局部名义应力或结构的结构应力需要决定，应将应力分成膜应力和壳体弯曲应力，而应力强度因子 K 应是两种应力分量的叠加。非连续性或缺口所产生的非线性峰值（remaining）应力的影响由附加系数 M_k 表达：

$$K = \sqrt{\pi a}\,(\sigma_{mem}Y_{mem}M_{kmem} + \sigma_{ben}Y_{ben}M_{kben})$$

式中，K 为应力强度因子；σ_{mem} 为膜应力；Y_{mem} 为膜应力强度因子校正函数；Y_{ben} 为壳弯曲应力强度因子校正函数；$M_{k\cdot mem}$ 为对以膜应力作用表征非线性应力峰值的修正（膜应力应力集中校正系数）；$M_{k\cdot ben}$ 为对以壳弯曲应力表征的非线性应力峰值的修正（壳弯曲应力应力集中校正系数）。

Y_{mem} 和 Y_{ben} 可由相关文献查出，推荐采用文献1～3给出的数据。但在大多数情况下，采用表9.2-4和表9.2-5已足够，而 M_k 可由下式求出：

$$M_k = \frac{\text{板件中具有应力集中时，裂纹尖端的 } K \text{ 值}}{\text{板件中无应力集中时，裂纹尖端的 } K \text{ 值}}$$

而 $M_{k\cdot mem}$ 对应于薄膜应力的 M_k 值，$M_{k\cdot ben}$ 对应于弯曲应力的 M_k 值。

对于对接接头、十字接头和具有角焊缝的焊接附件，M_k 是 a，B 和 L 的函数，如图9.2-20所示。

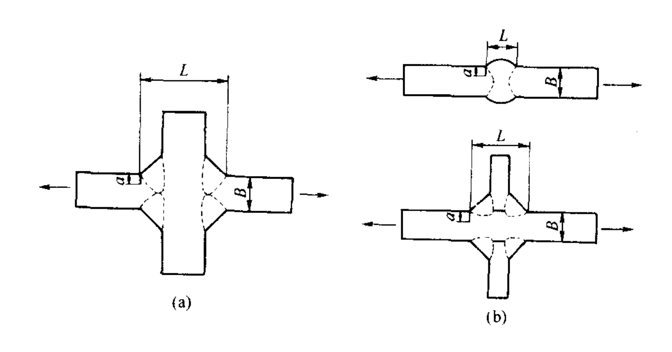
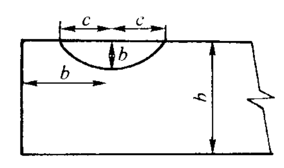


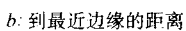
图9.2-20　裂纹和焊接接头几何形状

$M_k = a\left(\dfrac{a}{B}\right)^{\beta} - 1$，当 a/B 较大时，取 $M_k = 1$，式中 β 值由表9.2-6查出。

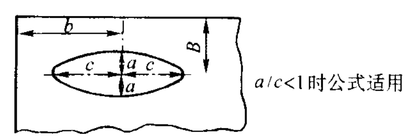
表 9.2-4　焊缝处应力强度因子计算公式

膜应力作用下的表面裂纹





b: 到最近边缘的距离



B: 到最近表面的距离

$a/c<1$ 时公式适用

$K_1=\sigma\sqrt{\pi a}/QF_s$

$Q=1+1.464\ (a/c)^{1.65}$

$F_s=[M_1+M_2\ (a/B)^2+M_3\ (a/B)^4]\ gff_w$

$M_1=1.13-0.09\ (a/c)$

$M_2=-0.54+0.89/\ (0.2+a/c)$

$M_3=0.5-1/\ (0.65+a/c)\ +14\ (1-a/c)^{24}$

$f_w=[\sec\ (\pi c\ \sqrt{a/B})\ /\ (2b)]^{0.5}$

g 和 f 方向有关

a 方向：$g=1$；$f=1$

c 方向：$g=1+\ (0.1+0.35\ (a/B))^2$；$f=\sqrt{a/c}$

膜应力作用下的埋藏裂纹

$a/c<1$ 时公式适用

$K_1=\sigma\sqrt{\pi a}/QF_s$

$Q=1+1.464\ (a/c)^{1.65}$

$F_s=[M_1+M_2\ (a/B)^2+M_3\ (a/B)^4]\ gff_w$

$M_1=1$

$M_2=0.05/\ [0.11+\ (a/c)^{3/2}]$

$M_3=0.29/\ [0.23+\ (a/c)^{3/2}]$

$f_w=[\sec\ (\pi c\ \sqrt{a/B})\ /\ (2b)]^{0.5}$

g 和 f 方向有关

a 方向：$g=1$；$f=1$

c 方向：$g=1-\ (a/B)^4/\ (1+4a/c)$；$f=\sqrt{a/c}$

壳体弯曲和膜应力共同作用的表面裂纹

$a/c<1$ 时公式适用

$K_1=\ (\sigma_m+H\sigma_b)\ \sqrt{\pi a}/QF_s$

$Q=1+1.464\ (a/c)^{1.65}$

$F_s=[M_1+M_2\ (a/B)^2+M_3\ (a/B)^4]\ gff_w$

$M_1=1.13-0.09\ (a/c)$

$M_2=-0.54-0.89/\ (0.2+a/c)$

$M_3=0.5-1/\ (0.65+a/c)\ +14\ (1-a/c)^{24}$

$f_w=[\sec\ (\pi c\ \sqrt{a/B})\ /\ (2b)]^{0.5}$

g 和 f 方向有关

a 方向：$g=1$；$f=1$

c 方向：$g=1+\ [0.1+0.35\ (a/B)^2]$；$f=\sqrt{a/c}$

H 可由下式求出：

a 方向：$H=1+G_1\ (a/B)\ +G_2\ (a/B)^2$

$G_1=-1.22-0.12\ (a/c)$

式中

$G_2=0.55-1.05\ (a/c)^{0.75}+0.47\ (a/c)^{1.5}$

c 方向：$H=1-0.34\ (a/B)\ -0.11\ (a/c)\ \times\ (a/B)$

内部压力作用下圆筒中的表面裂纹

$a/c<1$ 时公式适用

D 是直径（mm）、P 是内部压力（MPa）



续表 9.2-4

$K_1 = \sigma\sqrt{\pi a}/QF_s$

$\sigma = P \cdot D_{内}/(2B)$

$Q = 1 + 1.464(a/c)^{1.65}$

$F_s = 0.97[M_1 + M_2(a/B)^2 + M_3(a/B)^4]\ cgff_w$

$M_1 = 1.13 - 0.09(a/c)$

式中 $M_2 = -0.54 - 0.89/(0.2 + a/c)$

$M_3 = 0.5 - 1/(0.65 + a/c) + 14(1 - a/c)^{24}$

$f_w = [\sec(\pi c\sqrt{a/B})/(2 \cdot b)]^{0.5}$

$c = [(D_{外}^2 + D_{内}^2)/(D_{外}^2 - D_{内}^2) + 1 - 0.5\sqrt{a/B}] \times 2B/D_{内}$

g 和 f 是方向的函数

a 方向：$g = 1$；$f = 1$

c 方向：$g = 1 + [0.1 + 0.35(a/B)^2]$；$f = \sqrt{a/c}$

在内部压力作用下的曲面壳体的贯穿壁厚的裂纹

承受内部压力载荷的圆球内或圆孔内的纵向裂纹，M_k 为考虑应力集中的校正系数

$K = \sigma_m\sqrt{\pi a}M_K$

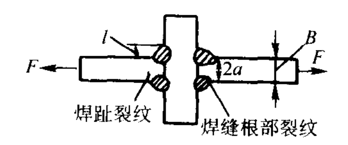
$M_k = 1.0$ 对于 $x < 0.8$

$M_k = \sqrt{(0.95 + 0.65x + 0.035x^{1.6})}$ 对于 $0.8 < x < 50$

$x = a/\sqrt{rB}$

式中、a 为裂纹的半长；r 为半径；B 为板厚

角焊缝十字接头的根部间隙



H/B 值由 0.2～1.2，公式适用

$a/W < 0.7$

$$K = \frac{\sigma(A_1 + A_2 a/W)\sqrt{\pi a}\sec(\pi a/2W)}{1 + 2 \times H/B}$$

式中 $W = H + B/2$

σ——纵向板中的标称应力范围

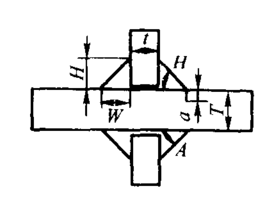
当 $x = H/B$

$A_1 = 0.528 + 3.287X - 4.361X^2 + 3.696X^3 - 1.875X^4 + 0.415X^5$

$A_1 = 0.218 + 2.717X - 10.171X^2 + 13.122X^3 - 7.755X^4 + 1.783X^5$

表 9.2-5 不同焊接接头的 M_k 值

横向非承载附件



参数	最小值	最大值
H/T	0.2	1
W/T	0.2	1
θ	15°	60°
A/T	0.175	0.72
t/T	0.125	2 (4)

$$M_k = C\left(\frac{a}{T}\right)^k \quad M_k \leqslant 1$$

$$C = 0.8068 - 0.1554\left(\frac{H}{T}\right) + 0.0429\left(\frac{H}{T}\right)^2 + 0.0794\left(\frac{W}{T}\right)$$

$$k = -0.1993 - 0.1893\left(\frac{H}{T}\right) + 0.0495\left(\frac{H}{T}\right)^2 + 0.0815\left(\frac{W}{T}\right)$$

续表 9.2-5

十字接头 K 形对接焊缝

参数	最小值	最大值
H/T	0.2	1
W/T	0.2	1
θ	15°	60°
A/T	0.175	1.3
t/T	0.5	20

$$M_k = C\left(\frac{a}{T}\right)^k \quad M_k \leqslant 1$$

$$C = 0.706\,1 - 0.409\,1\left(\frac{H}{T}\right) + 0.159\,6\left(\frac{H}{T}\right)^2 + 0.373\,9\left(\frac{W}{T}\right) - 0.132\,9\left(\frac{W}{T}\right)^2$$

$$k = -0.243\,4 - 0.393\,9\left(\frac{H}{T}\right) + 0.153\,6\left(\frac{H}{T}\right)^2 + 0.300\,4\left(\frac{W}{T}\right) - 0.099\,5\left(\frac{W}{T}\right)^2$$

十字接头角焊缝

参数	最小值	最大值
H/T	0.2	1
W/T	0.2	1
θ	15°	60°
A/T	0.175	0.8
t/T	0.5	1.0

$$M_k = C\left(\frac{a}{T}\right)^k \quad M_k \geqslant 1$$

当 $0.2 < H/T < 0.5$，$0.2 < W/T < 0.5$ 且 $a/T < 0.07$ 时：

$$C = 2.017\,5 - 0.805\,6\left(\frac{H}{T}\right) - 1.285\,6\left(\frac{W}{T}\right)$$

$$k = -0.358\,6 - 0.406\,2\left(\frac{H}{T}\right) + 0.465\,4\left(\frac{W}{T}\right)$$

当 $0.2 < H/T < 0.5$，$0.2 < W/T < 0.5$ 且 $a/T > 0.07$ 时：

$$C = 0.291\,6 - 0.062\,0\left(\frac{H}{T}\right) + 0.694\,21\left(\frac{W}{T}\right)$$

$$k = -1.114\,6 - 0.213\,2\left(\frac{H}{T}\right) + 1.431\,9\left(\frac{W}{T}\right)$$

当 $0.5 < H/T < 1.5$ 或 $0.5 < W/T < 1.5$ 时：

$$C = 0.905\,5 - 0.436\,9\left(\frac{H}{T}\right) + 0.175\,3\left(\frac{H}{T}\right)^2 + 0.066\,5\left(\frac{W}{T}\right)^2$$

$$k = -0.230\,7 - 0.547\,0\left(\frac{H}{T}\right) + 0.216\,7\left(\frac{H}{T}\right)^2 + 0.222\,3\left(\frac{W}{T}\right)$$

搭　接　接　头

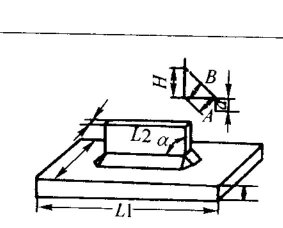
参数	最小值	最大值
H/T	0.25	1
W/T	0.25	2
U/T	0	1.5
θ	15°	70°
A/T	0.175	0.7
t/T	0.3	1

$$M_k = C\left(\frac{a}{T}\right)^k \quad M_k \geqslant 1$$

$$C = 1.021\,0 - 0.377\,2\left(\frac{H}{T}\right) + 0.184\,4\left(\frac{H}{T}\right)^2 + 0.018\,7\left(\frac{W}{T}\right)^2 - 0.185\,6\left(\frac{U}{T}\right) + 0.136\,2\left(\frac{U}{T}\right)^2$$

$$k = -0.453\,5 - 0.112\,1\left(\frac{H}{T}\right) + 0.340\,9\left(\frac{W}{T}\right) - 0.082\,4\left(\frac{W}{T}\right)^2 + 0.087\,7\left(\frac{U}{T}\right) - 0.041\,7\left(\frac{U}{T}\right)^2$$

续表 9.2-5

纵向非承载附件			
	参数	最小值	最大值
	L/T	5	40
	B/T	2.5	40
	$\theta/45°$	0.670	1.33
	t/T	0.25	2

$$M_k = C\left(\frac{a}{T}\right)^k \quad M_k \geqslant 1$$

$$C = 0.908\,9 - 0.235\,7\left(\frac{t}{T}\right) + 0.024\,9\left(\frac{L}{T}\right) - 0.000\,38\left(\frac{L}{T}\right)^2 + 0.018\,6\left(\frac{B}{T}\right) - 1.141\,4\left(\frac{\theta}{T}\right)$$

$$k = -0.022\,85 + 0.016\,7\left(\frac{t}{T}\right) - 0.386\,3\left(\frac{\theta}{45°}\right) + 0.123\,0\left(\frac{\theta}{45°}\right)^2$$

表 9.2-6　α 和 β 值

载荷类型	L/B	a/B	α	β
薄膜应力	≤2	$\leqslant 0.05\left(\frac{L}{B}\right)^{0.55}$	$0.51\left(\frac{L}{B}\right)^{0.27}$	-0.31
		$>0.05\left(\frac{L}{B}\right)^{0.55}$	0.83	$-0.15\left(\frac{L}{B}\right)^{0.46}$
	>2	≤0.073	0.615	−0.31
		>0.073	0.83	−0.20
弯曲应力	≤1	$\leqslant 0.03\left(\frac{L}{B}\right)^{0.55}$	$0.45\left(\frac{L}{B}\right)^{0.21}$	-0.31
		$>0.03\left(\frac{L}{B}\right)^{0.55}$	0.68	$-0.19\left(\frac{L}{B}\right)^{0.21}$
	>1	≤0.03	0.45	−0.31
		>0.03	0.68	−0.91

应当强调，在本书中对于位于局部应力集中区的缺陷，需考虑校正系数的 M_k 值，此时纳入了应力集中影响，但是在一些设计规范中（例如 IIW 推荐的设计规范）其设计数据是由不同焊接接头试样的疲劳试验得出的，即试验结果已然纳入了接头应力集中系数的影响，这表明只有在没有考虑应力集中影响的一些场合，才考虑本节中的应力集中校正。

3　疲劳强度

3.1　以标称应力表征的典型焊接结构件及接头的疲劳强度

目前，一些有关疲劳设计和评定的标准多采用此种形式的疲劳强度。如我国的钢结构设计规范 GB－17－88，欧洲钢结构协会的（European Convention for Constructional Steelwork）钢结构疲劳设计规范，日本的钢桥设计规范，美国铁路桥梁以及高速公路设计规范和作为许多标准依据的国际焊接学会的循环加载焊接钢结构的设计规范 IIWDOC-639—81 等。作者在《焊接结构的断裂行为及评定》一书中曾介绍了国际焊接学会第 XIII 委员会 XIII－1539－94 和第 XV 委员会 XV－845－94 联合提供的标准，但二年后，XIII-1539—96 和 XV－845－96 又对 94 年的文件标准做了修改和补充，2002 年又加入了不少新数据，因此作者将在此处给出 XIII－1539－96 和 XV-845—96 最新版本内容。应当说，新版本对老版本作了大量修改，例如对钢质结构以 15 条 $S-N$ 曲线代替了 XIII-1539—94（XV－845－94）标准中的 12 条 $S-N$ 曲线来分类，详尽的不同类别焊接接头疲劳强度如图 9.2-21 所示，添加了铝合金的不同接头的 $S-N$ 曲线分类（见图 9.2-22）等，但其出发点保持不变，它指出了在 200 万次（2×10^6）循环次数下的特定的疲劳强度，并将其定为疲劳级别 FAT。如 $S-N$ 曲线的 125 表示其在 2×10^6 循环次数下的以应力范围（最大最小应力之差）表征的疲劳强度为125 MPa，112 则表示在相同应力循环次数下的疲劳强度为 112 MPa 等。图上同时还示出以 500 万次循环次数定出的疲劳极限，它可用图上纵坐标的 $\Delta\sigma$ 推算（图中未示出相应值）。各条 $S-N$ 曲线具有相同的 m 值，即具有相同的斜率，它与循环次数之间的关系为：

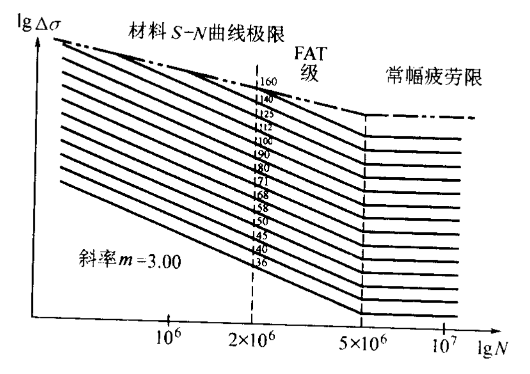


图 9.2-21　钢结构件的疲劳强度

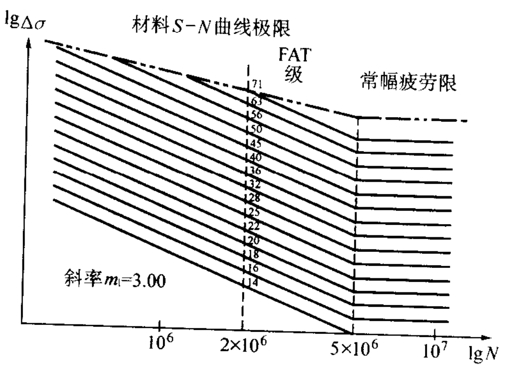


图 9.2-22　铝结构件的疲劳强度

$$N = \frac{C}{\Delta\sigma^m} \tag{9.2-8}$$

式中，c 为常数，它决定 $S-N$ 曲线的位置。具体的不同钢结构件的 FAT 值由表 9.2-7 给出，铝结构件的 FAT 值由表 9.2-8 给出。

表 9.2-7 钢结构件的疲劳强度

类别	结构细部	摘 述	FAT
100	构件非焊接部分		
111		轧制和冲压产品 1）板材和扁平件 2）轧制截面 3）无缝空心截面件 $m=5$ 在试验验证的情况下，对强度较高的钢材，需采用较高的 FAT 值 在任何循环次数下，构件的疲劳性能不高于此值	160
121		机械气切或剪切料，但无切割波痕，尖角打磨掉，经检查无裂纹，无可见缺陷 $m=3$	140
122		机械热切割边缘，尖角打磨掉，经检查无裂纹 $m=3$	125
123		手工热切割边缘，无裂纹和严重缺口 $m=3$	100
124		手工热切割边缘，不控制质量，缺口不深于 0.5 mm $m=3$	80
200	对接焊缝，横向承载		
211		横向受载对接焊缝（X 形坡口或 V 形坡口），磨平，100% 无损检测	125
212		工厂内平焊对接横向焊缝，焊趾角度 ≤30°，无损检测	100
213		不符合 212 条件的横向对接焊缝，经无损检测	80
214		在陶瓷焊垫上焊接的横向对接焊缝，焊根裂纹	80
215		不除去垫板的横向对接焊缝	71
216		无垫板单面焊，包括激光焊的横向对接焊缝，焊透根部无损检测 不采用无损检测	71 45

续表 9.2-7

类别	结构细部	摘 述	FAT
217		局部焊透的横向对接焊缝，分析建立在焊缝最大截面处应力的基础上，不考虑加高厚度此细部不推荐用于承载元件。建议用断裂力学验证	45
221	斜面 斜面	横向对接焊缝，打磨平，厚度和宽度平滑过渡 斜度 1:5 斜度 1:3 斜度 1:2	 125 100 80
222		工厂内水平施焊的横向对接焊缝，控制焊缝形状，无损检测，厚度和宽度平滑过渡 斜度 1:5 斜度 1:3 斜度 1:2	 100 90 80
223	斜面 斜面	横向对接焊缝，无损检测，厚度和宽度平滑过渡 斜度 1:5 斜度 1:3 斜度 1:2	 80 71 63
224		不具光滑过渡的不同厚度的横向对接焊缝，中心对正 如焊缝形状相等于中等斜率过渡时，见 222	71
225		由三块板组成的 T 形接头，根部裂纹	71
226	r b (r>b)	横向对接焊缝的翼板，焊缝在装配前焊接，打磨平，圆滑过渡，无损检测	112
231		轧制截面或非板状件的横向对接焊缝接头，焊缝磨平，无损检测	80
232		圆形空心截面的横向对接接头，单面焊，焊透 根部无损检测 不采用无损检测	 71 45
233		有永久垫板的管接头	71



续表 9.2-7

类别	结构细部	摘　　述	FAT
234		（长）方形空心截面的横向对接焊缝接头，单面焊，焊透 根部无损检测 不采用无损检测	 56 45
241	磨光面	横向对接打磨平的焊缝，接头接合处 100% 无损检测，圆角平滑过渡	125
242		厂内平焊的横向对接焊缝，监控焊缝形状，接头接合处无损检测，圆角平滑过渡	100
243	毛面	焊有角接板并经打磨十字接头的横向对接焊缝，接头接合处经无损检测，焊缝端部磨平 裂纹需在对接焊缝中萌生	80
244	毛面	焊有角接板十字接头的横向对接焊缝，接头接合处经无损检测，焊缝端部磨平 裂纹需在对接焊缝中萌生	71
245		十字接头横向对接焊缝 裂纹需在对接焊缝中萌生	50
300	承载纵焊缝		
311		空心截面的自动焊纵向焊缝，无起弧和熄弧部位 有起弧和熄弧部位	125 90
312		纵向对接焊缝，平行于载荷方向将两面打磨平，100%无损检测	125
313		纵向对接焊缝，无损检测，无熄弧和起弧部位 有熄弧和起弧部位	125 90



续表 9.2-7

类别	结构细部	摘　述	FAT
321		无熄弧和起弧部位的全熔透K形坡口自动焊连续纵向焊缝（计算翼缘中的应力范围），无损检测	125
322		无熄弧和起弧部位的连续自动纵向双面焊角焊缝（计算翼缘中的应力范围）	100
323		连续手工纵向角焊缝或对接焊缝（计算翼缘中的应力范围）	90
324		断续纵向角焊缝（在翼缘焊缝端部按名义应力 σ 计算，在腹板焊缝端部按剪切应力 τ 计算） $\tau/\sigma=0$ 0.0～0.2 0.2～0.3 0.3～0.4 0.4～0.5 0.5～0.6 0.6～0.7 >0.7	80 71 63 56 50 45 40 36
325		具有碗孔的纵向对接焊缝、角焊缝或断续焊缝（在翼缘焊缝端部按名义应力 σ 计算，在腹板焊缝端部按剪切应力 τ 计算）。碗孔的高度不大于腹板高度的40% $\tau/\sigma=0$ 0.0～0.2 0.2～0.3 0.3～0.4 0.4～0.5 0.5～0.6 >0.6	71 63 56 50 45 40 36
331	σ_f 2α σ_f t_f t_b σ_{st}	在翼缘与加强肋处接头根据接头形式应按411－414条款计算 加强板的应力： $$\sigma=\sigma_f\frac{A_f}{\sum A_{st}}\times 2\sin\alpha$$ A_f 为翼缘面积 A_{st} 为加强板面积 焊缝最高处应力： $$\sigma_w=\sigma_f\frac{A_f}{\sum A_w}\times 2\sin\alpha$$ A_w 为焊缝最高处面积	—

续表 9.2-7

类别	结构细部	摘　　述	FAT
332		弯曲型翼缘与腹板未经加强接头应按 411 - 414 条款根据接头形式计算 腹板中应力： $\sigma = \frac{F_g}{rt}$ 焊缝最高处应力： $\sigma_w = \frac{F_f}{r\sum a}$ F_f 为翼缘中的轴向力 t 为腹板厚度 a 为焊缝最高处尺寸	—
400	十字接头和/或 T 形接头		
411		十字接头或 T 形接头，K 形坡口对接焊缝熔透，无层状撕裂，不平度 $e<0.15t$，打磨平焊趾，焊趾裂纹	80
412		十字接头或 T 形接头，K 形坡口对接焊缝熔透，无层状撕裂，不平度 $e<0.15t$，焊趾裂纹	71
413		十字接头或 T 形接头，角焊缝或局部焊透 K 形坡口对接焊缝，无层状撕裂，不平度 $e<0.15t$ 焊趾裂纹	63
414		十字接头或 T 形接头，角焊缝或包括焊趾打磨局部焊透 K 形坡口对接焊缝 接头焊根裂纹 分析建立在焊缝最高处的应力基础上	45
415		激光焊接十字或 T 形接头，单边焊接 不平度 $e<0.1t$ 根部无损检测 非无损检测	 71 45
421		具有中间板的轧制截面接头，角焊缝、焊缝根部裂纹 分析建立在焊缝最大高度处应力之上	45
422		具有中间板的圆形空心截面接头，单面对接焊缝，焊趾裂纹 壁厚 > 8 mm 壁厚 < 8 mm	 56 50

续表 9.2-7

类别	结构细部	摘 述	FAT
423		具有中间板的圆形空心截面接头，角焊缝，根部裂纹 分析建立在焊缝最大应力处的基础之上 壁厚 > 8 mm 壁厚 < 8 mm	 45 40
424		（长）方形空心截面接头。单面对接焊缝，有焊趾裂纹 壁厚 > 8 mm 壁厚 < 8 mm	 50 45
425		具有中间板的（长）方形空心截面接头。角焊缝，根部裂纹 壁厚 > 8 mm 壁厚 < 8 mm	 40 36
431		连接腹板和翼缘的对接焊缝在垂直于焊缝的腹板平面内承受集中力，该力分布宽度 $b = 2h + 50$ mm 按 411 ~ 414 条款进行评定，需考虑偏心载荷熬成的局部弯曲	—
500		非承载附件	
511		横向非承载附件，该厚度比主板薄 K 形坡口对接焊缝，焊趾打磨平 双面角焊缝，焊趾打磨 焊接状态的角焊缝 比主板厚时	 100 100 80 71
512		梁腹板或翼缘上焊接的横向加劲板，比主板薄。对腹板上的焊缝端部采用主应力 K 形坡口对接焊缝，焊趾打磨 双面角焊缝，焊趾打磨 焊接状态的角焊缝 比主板厚时	 100 100 80 71
513		焊态非承载的螺柱焊	80
514	完全熔透的焊缝	焊于甲板上的梯形加劲板，完全熔透的对接焊缝，以加劲板厚度为计算基础，出平面弯曲	71

续表 9.2-7

类别	结构细部	摘　述	FAT
515	角焊缝 ≤0.5mm M_l M_r M_l a	焊于甲板上的梯形加劲板，角焊缝或局部焊透焊缝，以加劲板厚度和焊缝最大截面两者中的小者为计算基础	45
521	l	纵向角焊缝焊接的角接板 < 50 mm < 150 mm < 300 mm > 300 mm 角接板至板边缘见 525 条款	 80 71 63 50
522	(t) r c h	纵向角焊缝焊接的角接板，圆弧过渡，角焊缝端部加强和打磨，$c<2t$，最大为 25 mm $r>150$ mm	90
523	φ (t) r c h	焊于梁翼缘和平板上的纵向角焊缝的角接板，平滑过渡（剪切端部或圆弧状），$c<2t$，最大为 25 mm $r<0.5h$ $r<0.5h$ 或 $\varphi<20°$	 71 63
524	φ (t_2) r c (t_1) h	纵向侧平面角接板，焊于平板上或梁翼缘边缘处，平滑过渡（剪切端部或圆弧状）$C<2t_2$，最大为 25 mm $r>0.5h$ $r<0.5h$ 或 $\varphi<20°$ 对于 $t_2<0.7t_1$ 者，FAT 提高 12%	 50 45
525		纵向侧平面角接板，焊于平板上或梁翼缘边缘外 < 150 mm < 300 mm > 300 mm	 50 45 40
526	W r	纵向侧平面角接板，焊于平板边缘或梁翼缘边缘处，打磨或圆弧过渡 $r>150$ 或 $r/w>1/3$ $1/6<r/w<1/3$ $r/w<1/6$	 90 71 50
531	l≤100mm	圆形或（长）方形空心截面，用角焊缝焊于其他截面上。平行于应力方向的截面宽度 < 100 mm，或类似纵向附件	71



续表 9.2-7

类别	结构细部	摘　述	FAT
600		盖板接头	
611		角焊缝焊接的横向承载的盖板接头 母材处疲劳 焊缝最大截面处疲劳 应力循环比 $0 < R < 1$	 63 45
612		单面角焊缝纵向承载的盖板接头 母材处疲劳 焊缝处疲劳（以最大焊缝长度为 40 倍焊脚为基础计算）	 50 50
613		盖板接头，角焊缝焊接，不承载，平滑过渡（$\varphi <$ 20°的剪切端部或圆弧状），焊于承载元件上 $C < 2t$，最大为 25 mm 焊于平的杆件上 焊于球状截面 焊于角截面上	 63 56 50
700		加强板	
711		I 型梁上长叠板的端部，焊缝端部（翼缘上焊缝端部处为计算应力范围） $t_D \leqslant 0.8t$ $0.8t < t_D \leqslant 1.5t$ $t_D > 1.5t$	 56 50 45
712		梁上长叠板的端部，打磨的加强焊缝端部（应力范围计算处为翼缘中的焊趾处） $t_D \leqslant 0.8t$ $0.8t < t_D \leqslant 1.5t$ $t_D > 1.5t$	 71 63 56
721		（长）方形空心截面上的加强板端部 板厚 $t < 25$ mm	50
731		用角焊缝焊上的加强板，焊缝焊趾打磨平 焊趾保持焊态 分析建立在修正的名义应力基础上	 80 71





续表 9.2-7

类别	结构细部	摘　　述	FAT
800	法兰、支管和人孔		
811		法兰、完全熔透焊缝	71
812		法兰、局部熔透或角焊缝 板焊趾处裂纹 焊缝最大截面处根部裂纹	 63 45
821		法兰、具有差不多完全熔透的对接焊缝，计算按管中修正的名义应力，焊趾裂纹	71
822		法兰、角焊缝焊接，计算按管中修正的名义应力，焊趾裂纹	63
831		插入平板内的管子或支管，K 形坡口对接焊缝 如果管直径大于 50 mm，需考虑周边应力集中	80
832		插入平板内的管子或支管，角焊缝 如果管直径大于 50 mm，需考虑周边应力集中	71
841		焊于平板上的喷嘴，采用钻孔的方法除去根部焊道 如果管直径大于 50 mm，需考虑周边应力集中	71
842		焊于管子上的喷嘴，保留根部焊道 如果管直径大于 50 mm，需考虑周边应力集中	63
900	管接头		
911		焊后不经过处理的圆形空心截面与实心轴对焊接头	63

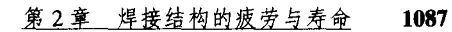
续表 9.2-7

类别	结构细部	摘　　述	FAT
912		用单面对接焊施焊的构件与圆形空心截面接头，底部留有钝边 根部裂纹	63
913		用单面对接焊或双面角焊缝施焊的构件与圆形空心截面接头 根部裂纹	50
921		在圆盘上焊接的圆形空心截面 K形坡口对接接头、焊趾打磨 角焊缝、焊趾打磨 角焊缝、焊后不经处理	 90 90 71
931		管－板接头，接头处管子压平、对接焊缝（X形坡口） 管径＜200 mm 板厚＜20 mm	71
932		管—板接头，板插入压扁的管端部，然后焊合 管径＜200 mm且 板厚＜20 mm 管径＞200 mm或 板厚＞20 mm	 63 45

表 9.2-8　铝结构件的疲劳强度

类别	结构细部	摘　　述	FAT
100	构件非焊接部分		
111		轧制和冲压产品或边缘加工的构件，$m=5$ AA5000/6000 合金 AA7000 合金 在任何循环次数下，元件疲劳性能均低于上述值	 71 80
122		机械气割边缘，尖角打磨掉，经检查无裂纹 $m=3$	40





续表 9.2-8

类别	结构细部	摘 述	FAT
200		对接焊缝，横向承载	
211		横向受载对接焊缝（X 形坡口或 V 形坡口），打磨成平面，100%无损检测	50
212		工厂中水平施焊的横向对接焊缝，坡口内角≤30°，无损检测	40
213		横向对接焊缝，坡口角≤50°	32
215		横向对接焊缝，坡口角 > 50°或横向对接焊缝，保留垫板	25
216		无垫板单边施焊的横向对接焊缝，焊透 根部无损检测 不采用无损检测	28 18
221	斜面 斜面	横向对接焊缝，打磨平，厚度和宽度平滑过渡 斜度 1:5 斜度 1:3 斜度 1:2 有不平度时见 3.8.2	40 32 25
222		工厂内水平施焊的横向对接焊缝，控制焊缝形状，无损检测，厚度和宽度平滑过渡 斜度 1:5 斜度 1:3 斜度 1:2 有不平度时见 3.8.2	32 28 25
223	斜面 斜面	横向对接焊缝，无损检测，厚度和宽度平滑过渡 斜度 1:5 斜度 1:3 斜度 1:2 有不平度时见 3.8.2	25 22 20
224		不具光滑过渡的不同厚度的横向对接焊缝，中心对正 如焊缝形状相等于中等斜率过渡时，见 222	22
225		三块板接头，根部裂纹	22
226	r b $(r \geqslant b)$	横向对接焊缝的翼板，焊缝在装配前焊接，打磨平，圆滑过渡，无损检测	45



续表 9.2-8

类别	结构细部	摘　　述	FAT
300		承载纵焊缝	
311		空心截面的自动焊纵向焊缝，无起弧和熄弧部位 有起弧和熄弧部位	50 36
312		纵向对接焊缝，平行于载荷方向将两面打磨平，100%无损检测	50
313		纵向对接焊缝，无损检测，无熄弧和起弧部位 有熄弧和起弧部位	45 36
321		无熄弧和起弧部位的全熔透 K 形坡口自动焊连续纵向焊缝（计算翼缘中的应力范围），无损检测	50
322		无熄弧和起弧部位的连续自动纵向双面焊角焊缝（计算翼缘中的应力范围）	40
323		连续手工纵向角焊缝或对接焊缝（计算翼缘中的应力范围）	36
324		断续纵向角焊缝（计算翼缘中焊缝端部的名义应力 σ 和腹板焊缝端部的剪切应力 τ） $\tau/\sigma=0$ 0.0～0.2 0.2～0.3 0.3～0.4 0.4～0.5 0.5～0.6 0.6～0.7 >0.7	 32 28 25 22 20 18 16 14
325		具有碗孔的纵向对接焊缝，角焊缝或断续焊缝（计算翼缘中焊缝端部的名义应力 σ 和腹板焊缝端部的剪切应力 τ）。碗孔的高度不大于腹板的高度的 40% $\tau/\sigma=0$ 0.0～0.2 0.2～0.3 0.3～0.4 0.4～0.5 0.5～0.6 >0.6	 28 25 22 20 18 16 14



续表 9.2-8

类别	结构细部	摘　述	FAT
331		在翼缘与加强肋处接头根据接头形式应按 411 ~ 414 条款计算 加强肋的应力： $\sigma = 2\sin\alpha\sigma_f \frac{A_f}{\sum A_{st}}$ A_f 为翼缘面积 A_{st} 为加强肋面积 焊缝最高处应力： $\sigma_w = 2\sin\alpha\sigma_f \frac{A_f}{\sum A_w}$ A_w 为焊缝最高处面积	—
332		弯曲型翼缘与腹板未经加强接头应按 411 – 414 条款根据接头形式计算 腹板中应力： $\sigma = \frac{F_g}{rt}$ 焊缝最高处应力： $\sigma_w = \frac{F_f}{r\sum a}$ F_f 为翼缘中的轴向力 t 为腹板厚度 a 为焊缝最高处尺寸	—
400	十字接头和/或 T 形接头		
411		十字接头或 T 形接头，K 形坡口对接焊缝熔透，无层状撕裂，不平度 $e<0.15t$，打磨平焊趾，焊趾裂纹	28
412		十字接头或 T 形接头，K 形坡口对接焊缝熔透，无层状撕裂，不平度 $e<0.15t$，焊趾裂纹	25
413		十字接头或 T 形接头，角焊缝或局部焊透 K 形坡口对接焊缝， 不平度 $e<0.15t$ 焊趾裂纹	22
414		十字接头或 T 形接头，角焊缝或包括焊趾打磨局部焊透 K 形坡口对接焊缝接头 焊根裂纹 分析建立在焊缝最高处的应力基础上	16
500	非承载附件		
511		横向非承载附件，该厚度比主板薄 K 形坡口对接焊缝，焊趾打磨平 双面角焊缝，焊趾打磨 焊接状态的角焊缝 比主板厚时	36 36 28 25



续表 9.2-8

类别	结构细部	摘　　述	FAT
512		梁腹板或翼缘上焊接的横向加劲板，比主板薄。对腹板上的焊缝端部采用主应力 K 形坡口对接焊缝，焊趾打磨 双面角焊缝，焊趾打磨 焊接状态的角焊缝 比主板厚时	36 36 28 25
513		焊态非承载的螺柱焊	28
514	完全熔透的焊缝	焊于甲板上的梯形加劲板，完全熔透的对接焊缝，以加劲板厚度为计算基础，出平面弯曲	25
515	角焊缝 <0.5mm	焊于甲板上的梯形加劲板，角焊缝或局部焊透焊缝，以加劲板厚度和焊缝最大截面两者中的小者为计算基础	16
521		纵向角焊缝焊接的角接板 < 50 mm < 150 mm < 300 mm > 300 mm 角接板至板边缘见 525 条款	28 25 20 18
522		纵向角焊缝焊接的角接板，圆弧过渡，角焊缝端部加强和打磨，$c < 2t$，最大为 25 mm $r > 150$ mm	32
523		焊于梁翼缘和平板上的纵向角焊缝的角接板，平滑过渡（剪切端部或圆弧状），$c < 2t$，最大为 25 mm $r > 0.5h$ $r < 0.5h$ 或 $\phi < 20°$	25 20
524		纵向侧平面角接板，焊于平板上或梁翼缘边缘处，平滑过渡（剪切端部或圆弧状）$C < 2t_2$，最大为 25 mm $r > 0.5h$ $r < 0.5h$ 或 $\phi < 20°$ 对于 $t_2 < 0.7t_1$ 者，FAT 提高 12%	18 16

续表 9.2-8

类别	结构细部	摘　述	FAT
525		纵向侧平面角接板，焊于平板上或梁翼缘边缘外 < 150 mm < 300 mm > 300 mm	 18 16 14
526		纵向侧平面角接板，焊于平板边缘或梁翼缘边缘处，打磨或圆弧过渡 $r > 150$ 或 $r/w > 1/3$ $1/6 < r/w < 1/3$ $r/w < 1/6$	 36 28 22
600		盖板接头	
611		角焊缝焊接的横向承载的盖板接头 母材处疲劳 焊缝最大截面处疲劳 应力循环比 $0 < R < 1$	 22 16
612		单面角焊缝纵向承载的盖板接头 母材处疲劳 焊缝处疲劳（以最大焊缝长度为 40 倍焊脚为基础计算）	 18 18
613		盖板接头，角焊缝焊接，不承载，平滑过渡（$\varphi <$ 20°的剪切端部或圆弧状），焊于承载元件上 $C < 2t$，最大为 25 mm 焊于平的杆件上 焊于球状截面 焊于角截面上	 22 20 18
700		加强板	
711		I 型梁上长叠板的端部，焊缝端部（翼缘上焊缝端部处为计算应力范围） $t_D \leqslant 0.8t$ $0.8t < t_D \leqslant 1.5t$ $t_D < 1.5t$	 20 18 16
712		梁上长叠板的端部，打磨的加强焊缝端部（应力范围计算处为翼缘中的焊趾处） $t_D \leqslant 0.8t$ $0.8t < t_D \leqslant 1.5t$ $t_D > 1.5t$	 28 25 22
721		（长）方形空心截面上的加强板端部 板厚 $t < 25$ mm	20
731		用角焊缝焊上的加强板，焊缝焊趾打磨平 焊趾保持焊态 分析建立在修正的名义应力基础上	32 25

续表 9.2-8

类别	结构细部	摘述	FAT
800	法兰、支管和人孔		
811		法兰、完全熔透焊缝	25
812		法兰、局部熔透或角焊缝 板焊趾处裂纹 焊缝最大截面处根部裂纹	22 16
821		法兰、具有差不多完全熔透的对接焊缝，计算按管中修正的名义应力，焊趾裂纹	25
822		法兰、角焊缝焊接，计算按管中修正的名义应力，焊趾裂纹	22
831		插入平板内的管子或支管，K形坡口对接焊缝 如果管直径大于50 mm，需考虑周边应力集中	28
832		插入平板内的管子或支管，角焊缝 如果管直径大于50 mm，需考虑周边应力集中	25
841		焊于平板上的喷嘴，采用钻孔的方法除去根部焊道 如果管直径大于50 mm，需考虑周边应力集中	25
842		焊于管子上的喷嘴，保留根部焊道 如果管直径大于50 mm，需考虑周边应力集中	22
900	管接头		
911		焊后不经过处理的圆形空心截面与实心轴对焊接头	22

续表 9.2-8

类别	结构细部	摘 述	FAT
912		用单面对接焊施焊的构件与圆形空心截面接头，底部留有钝边 根部裂纹	22
913		用单面对接焊或双面角焊缝施焊的构件与圆形空心截面接头 根部裂纹	18
921		在圆盘上焊接的圆形空心截面 K 形坡口对接接头、焊趾打磨 角焊缝、焊趾打磨 角焊缝、焊后不经处理	 32 32 25

此表中所示出的 FAT 值是根据试验研究定出的，因此它自然地纳入了下述事实和影响：焊缝形状所引起的局部应力集中；一定范围内的焊缝尺寸和形状偏差；应力方向；残余应力；冶金状态；焊接过程和随后的焊缝改善处理。

这说明如果构件和接头中还存在其他原因所产生的应力集中，由于本表的 FAT 并未考虑之，因此在疲劳载荷计算中要乘以该应力集中系数，或将对应的 FAT 值除以该应力集中系数。

再有，一般说来疲劳裂纹产生于焊趾处，然后向母材方向扩展，或产生于焊缝根部然后沿焊缝最大高度截面处扩展，因此对于焊趾处裂纹，应计算母材的标称应力范围，再与此表的疲劳强度相比；对于焊缝根部裂纹则应计算焊缝最大高度截面处的标称应力范围。在某些情况下，如角焊缝十字接头，因两种疲劳失效形式均有可能，因此应计算上述两处的标称应力范围、所计算的标称应力范围值应保证在弹性范围内。一般标称应力范围设计值对正应力来说不超过 1.5 倍屈服限（σ_s），对于标称剪切应力应不超过 $1.5\sigma_s/\sqrt{3}$。

应当说明当采用切应力疲劳强度曲线时，通常此种疲劳失效其裂纹扩展是沿 0.7 K（焊脚）角焊缝截面（最大高度截面）进行的。此时 $m=5$，因没有常幅疲劳限，取循环数 10^8 次为截止限，如图 9.2-23 所示，有关数值如表 9.2-9 所示。

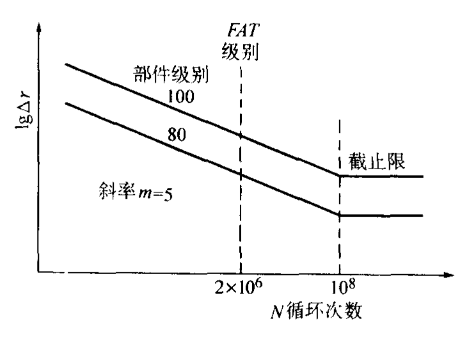


图 9.2-23 钢结构件剪切应力范围的疲劳强度曲线

表 9.2-9 钢结构件剪切破坏的疲劳强度

构 件 细 部	FAT 级别	lg$C$（$m=5$ 时）	截止限时的应力范围 /MPa
母材、完全熔透对接焊缝	100	16.301	46
角焊缝，局部熔透对接焊缝	80	15.816	36

3.2 按热点应力决定构件疲劳强度

采用按标称应力范围确定构件及接头疲劳强度最大的不足之处是按不同接头形式分类的 $S-N$ 曲线过多，以至于同一个焊接结构内将用若干条 $S-N$ 曲线进行评定，以致难以进行统一设计，图 9.2-15 是桥梁结构的实例，如采用标称应力研究其疲劳强度，试验表明，其分散性太大，以致难以确定精确的 $S-N$ 曲线（图 9.2-15a）。采用热点应力评定，则分散性大大减少，因此可用单一的 $S-N$ 曲线表述它们的疲劳强度（图 9.2-15b）。这也是热点应力方法的最大优点即以一条 $S-N$ 曲线可以表示不同类别焊接接头的疲劳强度，因而可大大减少接头按疲劳强度划分的级别。换句话说，如采用热点应力法，以若干条 $S-N$ 曲线即可以表示出所有类别焊接接头的疲劳强度。目前对其正在进行大量试验研究工作，表 9.2-10，表 9.2-11 示出了目前的研究成果。

从另一方面讲，由于热点应力疲劳强度自 1991 年才开始引起工程界重视，目前的研究尚处于起步阶段。国际焊接学会推荐以下述方法确定一些焊接接头的热点应力疲劳强度，即首先在标称应力疲劳强度中（表 9.2-7）选一参考部件，它与待评部件的形状和施载条件应尽量一致，然后对参考部件和待评部件进行有限元计算，分别确定它们的热点应力 σ_{greq} 和 σ_{gass}，注意建立有限元模型时要使二者的网格和单元类型一致，则 2×10^6 次时待评部件的热点应力疲劳强度为

$$FAT_{ass}=\frac{\sigma_{gass}}{\sigma_{g\cdot req}}FAT_{req} \tag{9.2-9}$$

式中，FAT_{req} 为参考部件在 2×10^6 次时的疲劳强度，取自表 9.2-7。



表 9.2-10　钢结构件以热点应力表达的疲劳强度

类　别	结构细部	摘　述	要　求	FAT
1		对接接头，特优质量	不平度要求①	112
2		对接接头，标准质量	不平度要求①	100
3		十字接头，K形坡口对接焊缝，全焊透	焊趾坡口角≤60° 不平度要求①	100
4		非承载角焊缝	焊趾坡口角≤60° 不平度要求①	100
5		纵向加强板端部	焊趾坡口角≤60°	100
6		碗板端部和类似接头	焊趾坡口角≤60°	100
7		十字接头承载角焊缝	焊趾坡口角≤60° 不平度要求①	90

①　本表未包括不平度影响。在计算应力时应考虑。

表 9.2-11　铝结构件以热点应力表达的疲劳强度

类　别	结构细部	摘　述	要　求	FAT
1		对接接头，特优质量	不平度要求①	45
2		对接接头，标准质量	不平度要求①	40
3		十字接头，K形坡口对接焊缝，全焊透	焊趾坡口角≤60° 不平度要求①	40
4		非承载角焊缝	焊趾坡口角≤60° 不平度要求①	40
5		纵向加强板端部	焊趾坡口角≤60°	40
6		碗板端部和类似接头	焊趾坡口角≤60°	40
7		十字接头承载角焊缝	焊趾坡口角≤60° 不平度要求①	36

①　本表未包括不平度影响，在计算应力时应考虑。



3.3 按缺口应力给定的构件疲劳强度

IIW.DOC.X111 – 1539 – 94/XV – 845 – 96 推荐的缺口应力疲劳强度如表 9.2-12 所示。目前尚缺少适用于铝材的该 FAT 值。

表 9.2-12 等效缺口疲劳强度

焊缝缺口值	摘 述	FAT
以等于 1 mm 的等效缺口半径代替焊趾和根部缺口	焊态缺口，正常焊接质量 $m=3$	225

3.4 结构件疲劳强度的修正

3.4.1 应力循环比

当焊接构件中具有高值残余应力时，构件疲劳强度与构件承受的应力范围有关，而与应力循环比无关。但对于薄板构件、小尺寸构件或应力消除构件，其疲劳强度值增高且与应力循环比有关，因此应对表 9.2-7 示出的 FAT 值进行修正。IIW 有关规范推荐，当应力循环比 $R<0.5$ 时，对于钢材和铝材应采用疲劳增强系数 $f(R)$ 乘以相应待评构件的疲劳级别数值（FAT）表征 $R<0.5$ 时构件的疲劳强度，可区分为下述三种情况：

基本金属和残余应力可忽略不计的成形构件：

$f(R)=1.6$ 对于 $R<-1$

$f(R)=-0.4R+1.2$ $-1\leqslant R\leqslant 0.5$

$f(R)=1$ $R>0.5$

含有焊缝的小尺寸、薄壁简单结构元件

$f(R)=1.3$ 对于 $R<-1$

$f(R)=-0.4R+0.9$ $-1\leqslant R\leqslant -0.25$

$f(R)=1$ $R\geqslant -0.25$

复杂的二维三维构件；具有高值残余应力的构件；厚壁构件

$f(R)=1$ 任何 R 值均无增强影响

具体情况见图 9.2-24。

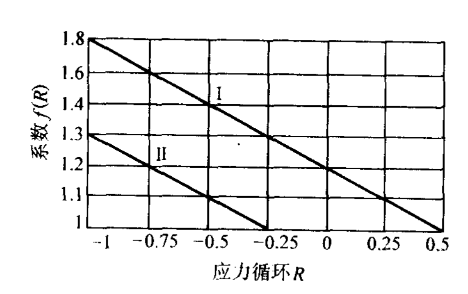


图 9.2-24 不同情况的 $f(R)$ 值

Ⅰ—低残余应力；Ⅱ—中等残余应力

3.4.2 考虑板厚影响的修正

当疲劳裂纹从板厚（钢材和铝材）大于 25 mm 的焊趾处起始时，则需考虑板厚对疲劳强度的影响，该降低后的疲劳强度值为某结构元件（或接头）的疲劳级别（FAT 值）乘以降低系数：

$$f(t)=\left(\frac{25}{t_{eff}}\right)^n,\text{式中}, t>25\ \text{mm};$$

如果 $L/t\leqslant 2$，则 $t_{eff}=0.5L$；

在其他情况下，$t_{eff}=t$（板厚）。

厚度校正指数 n 值与有效厚度 t_{eff} 和接头级别有关，其取值见表 9.2-13。

表 9.2-13 厚度校正指数 N

接头类别	状态	N
十字接头，T 形接头，具有横向加劲的平板	焊态	0.3
十字接头，T 形接头，具有横向加劲的平板	焊趾打磨	0.2
横向对接焊缝	焊态	0.2
对接焊缝磨平，基本金属，纵向焊缝，纵向加筋	不限	0.1

焊趾距离 L 如图 9.2-25 所示。

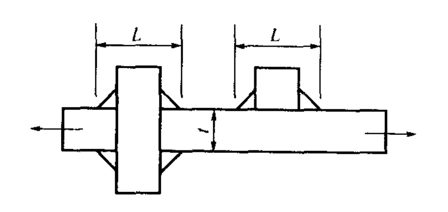


图 9.2-25 焊趾距离 L

4 断裂力学在焊接结构疲劳裂纹扩展中的应用

4.1 裂纹的亚临界扩展

实际构件在加工制造和使用过程中，由于各种原因（如焊接、锻造、表面划痕等）往往存在着各种类型的缺陷。带有缺陷的构件，在变载荷的作用下，缺陷可能逐渐扩展。应用断裂力学把疲劳设计建立在构件本身存有缺陷这一客观事实的基础上，按照裂纹在循环载荷下的扩展规律，估算结构的寿命是保证构件安全工作的重要途径，同时也是对传统疲劳试验分析方法的一个重要补充和发展。

一个含有初始裂纹 a_0 的构件，当承受静载荷时，只有在其应力水平达到临界应力 σ_c 时（图 9.2-26），亦即当其裂纹尖端的应力强度因子达到临界值 K_{IC}（K_C）时，才会发生失稳破坏。假如构件承受一个低于 σ_c 但又足够大的循环应力，那么这个初始裂纹 a_0 便会发生缓慢扩展，当达到临界裂纹尺寸时，会使构件发生破坏。裂纹在循环应力作用下，由初始裂纹 a_0 到临界值 a_c 这一段扩展过程，就是疲劳裂纹的亚临界扩展阶段。

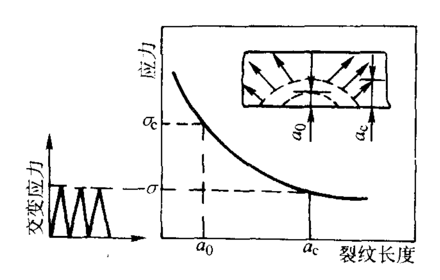


图 9.2-26 亚临界裂纹扩展与其临界尺寸

Paris – Erdogon 指出，应力强度因子 K 既然能够表示裂纹尖端的应力场强度，那么也可以认为 K 值是控制裂纹扩展速率的重要参量，并由此提出了以下关于裂纹扩展的重要经验公式：

$$\mathrm{d}a/\mathrm{d}N=c(\Delta K)^m \qquad (9.2\text{-}10)$$

式中，ΔK 为应力强度因子范围（$\Delta K=K_{max}-K_{min}$，它等于最大载荷时的应力强度因子值减去最小载荷时的应力强度因子值）；c、m 为由材料决定的常数。严格说来 c、m 与应力状态和环境因素有关。



为了推导裂纹扩展速率 da/dN 与相应的应力强度因子范围 ΔK 的关系，一般可分为两个阶段，第一阶段为确立裂纹长度 a 与施加循环次数 N_i 间的关系，即建立 $a-N$ 曲线。图9.2-27示出采用LB52NS焊条施焊的A537钢焊接接头的 $a-N$ 曲线。可见随裂纹长度增加和施加应力的增加，裂纹扩展速率提高。第二阶段是在 $a-N$ 曲线基础上推算不同裂纹长度值时的 da/dN 与 ΔK 的关系。对此，两种方法均是有效的。其一是在 $a-N$ 曲线几个相关点上引出切线，并推算其斜率，即为对应相关 ΔK 点的裂纹扩展速率 da/dN。第二种方法是采用计算机技术进行曲线拟合，最终建立 $da/dN-\Delta K$ 的曲线关系。常用的手段为七点递增多项式法。

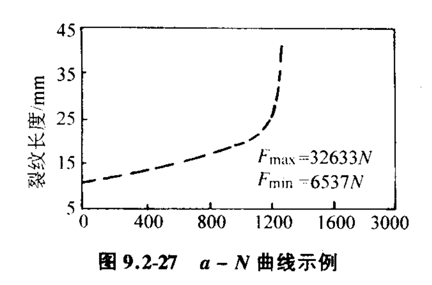


图 9.2-27　$a-N$ 曲线示例

4.2　疲劳裂纹扩展特性 $da/dN-\Delta K$ 曲线的一般关系

根据疲劳裂纹扩展的指数定律，整理各种材料的大量试验数据发现，各种金属材料的指数大约在 $m=2\sim7$ 的范围内，其中绝大多数材料 $m=2\sim4$。

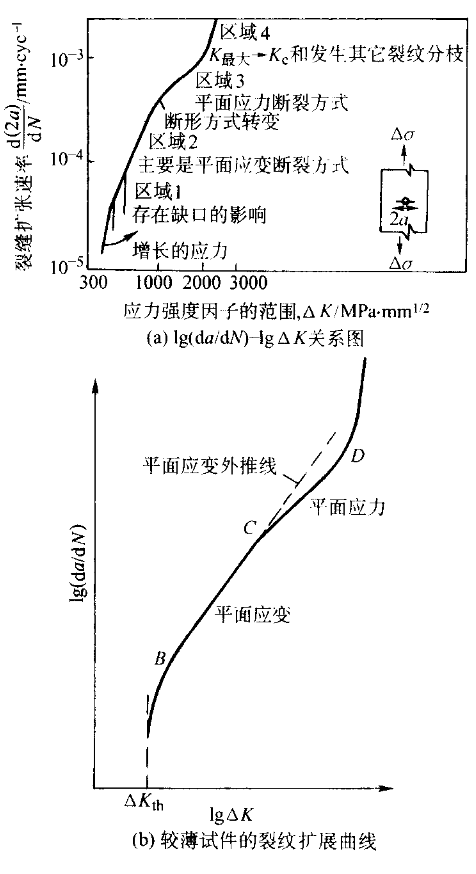
进一步研究各种金属材料的 $da/dN-\Delta K$ 在双对数坐标上的关系时，发现它们之间的关系在宽广的 ΔK 范围内，并非由一条直线，而是由四条不同斜率的线段组成。其形状如图9.2-28所示。

在应力强度因子范围小于某一界限值时，裂纹不发生扩展，此界限值定义为 ΔK_{th}（即门槛值）。它是材料固有的特性。Pook把裂纹扩展速率相当于每次循环为一个晶粒间距时，或在金属中它相当于每次循环扩展值等于 4×10^{-7} mm的界限值时定义为该材料的裂纹扩展的门槛值。当外加应力强度因子范围达到此界限值 ΔK_{th} 后，裂纹扩展速率急剧上升，此线段的斜率几乎与纵坐标轴相平行。

此后稍微增加一点 ΔK 值，da/dN 与 ΔK 呈指数 m_1 的关系变化。对钢材而言，屈服点、抗拉强度、加工硬化条件、组织结构以及温度等，对此阶段的斜率基本上不发生明显的影响。从试样断口可以看出，在此扩展阶段内为平断口，与外加拉应力成90°。电子金相图片表明它为穿晶断裂，且具有典型的疲劳辉纹。

继续增加 ΔK 时，出现斜率转折点Ⅰ，过此点后斜率降低为 m_2 即 $m_2<m_1$。宏观断口表明，在此阶段内出现切变斜断口，断口表面与外力成45°。而它的电子金相图片表明，断口为解理断裂和韧窝断裂的混合型。与断裂转折点Ⅰ对应的裂纹扩展速率，一般在 $10^{-3}\sim10^{-4}$ mm/周的范围内。测定转折点以及转折点两侧的斜率，对精确估算结构疲劳寿命，具有实际意义。

继续增加 ΔK 值，当 K_{max} 逐渐迫近材料的 K_{IC}（K_C）值时，达到了材料的第Ⅱ转折点，过此点后，其斜率将增大，点Ⅱ实际上是裂纹扩展速率加速转变点，大体上在一恒定裂纹张开位移幅度下发生。研究表明此转折点Ⅱ所对应的 $\Delta\delta_t=3.96\times10^{-2}$ mm，$\Delta\delta_t$ 即为转折点Ⅱ上的裂纹尖端张开位移幅度。



(a) $\lg(da/dN)$-$\lg\Delta K$ 关系图

(b) 较薄试件的裂纹扩展曲线

图 9.2-28　裂纹扩展曲线图

在焊接结构的实际应用中，可以忽略平面应力区。这是因为在焊接接头中，由于疲劳裂纹经常为埋藏或表面裂纹，因此平面应变状态的断裂占其疲劳寿命的主要部分，而平面应力断裂所占寿命部分比例有限。另外如图9.2-28（b）所示，从安全角度出发，假如把平面应变时的 $da/dN-\Delta K$ 关系应用于平面应力部分，即把 BC 线延长（图上虚线所示）。其结果是稍偏于安全（因为平面应变状态下裂纹扩展速率高于平面应力时的裂纹扩展速率）。同样把 BC 线段向相反方向延伸（即向门槛值方向延伸），也是得到较为安全的效果。因此以平面应变性质为基础的Paris裂纹扩展速率定律能够安全地应用。

日本国家金属研究所对焊态焊接接头的疲劳裂纹扩展特性通过试验进行了系统的、深入的研究。裂纹扩展区（焊缝、热影响区）材料（试验材料为铁素体、珠光体、马氏体、奥氏体不锈钢等5种）、焊接方法（焊条电弧焊、气体保护焊、埋弧焊）、热输入能等参量的影响分别示于图9.2-29～图9.2-32中，可见这些参量对焊态焊接接头的扩展特性影响不大，它们都具有很窄的分散带。甚至与母材相比，其应力循环比对焊态焊接接头的疲劳裂纹扩展特性的影响大为降低（图9.2-33和图9.2-34）。这是因为在裂纹尖端存有高值的拉伸残余应力，它大大削弱了应力循环比的作用。

4.3　疲劳裂纹扩展寿命的估算

（1）国际焊接学会推荐的 c，m 以及值 ΔK_{th}

在缺少试验得出 c，m 和 ΔK_{th} 时，11W XIII-1539－94/XV-845－94推荐采用下述 c，m 和 ΔK_{th} 值来表征 $da/dN-\Delta K$ 的关系曲线：

对于钢材：$c=3\times10^{-3}$，$m=3$，$\Delta K_{th}=190-144R$ 但 ΔK_{th} 不低于62 N/mm$^{-3/2}$。

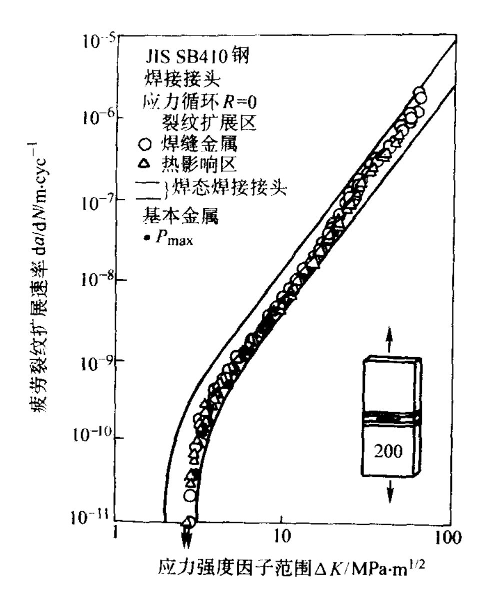


图 9.2-29　接头中焊缝和热影响区的裂纹扩展性能

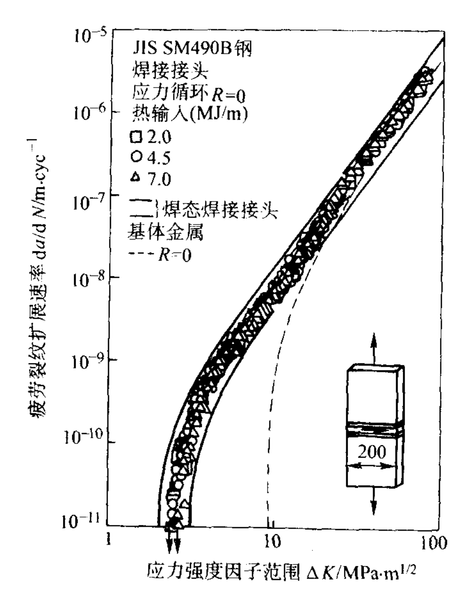


图 9.2-32　不同热输入能量制备的焊接接头疲劳裂纹扩展性能

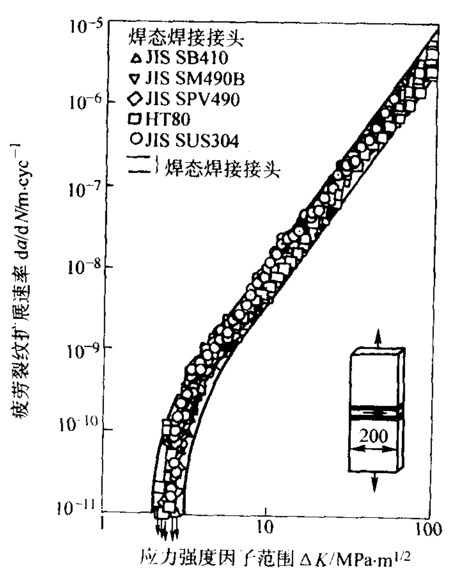


图 9.2-30　不同钢材接头的疲劳裂纹扩展性能

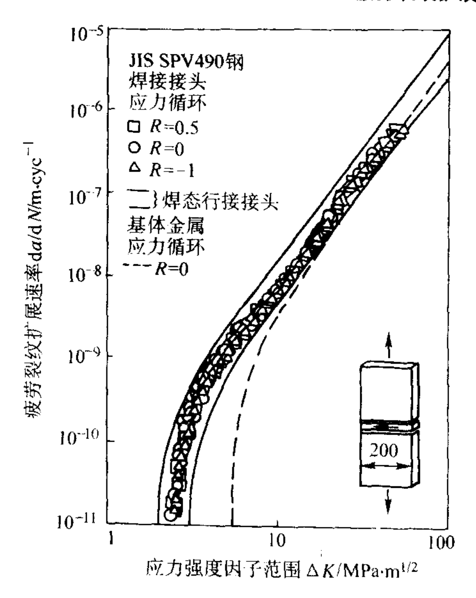


图 9.2-33　不同应力循环比下焊接接头的疲劳裂纹扩展性能

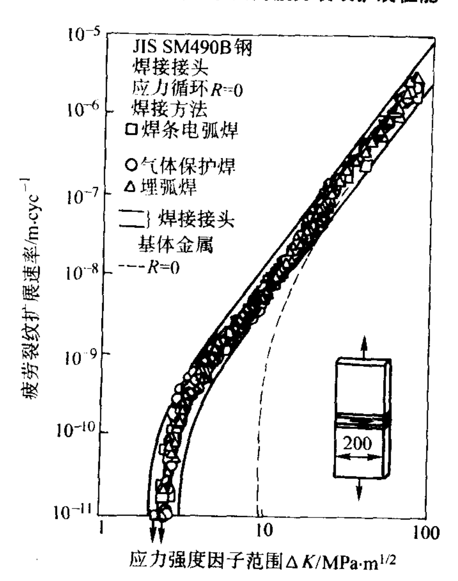


图 9.2-31　不同焊接方法制备的焊接接头的疲劳裂纹扩展性能

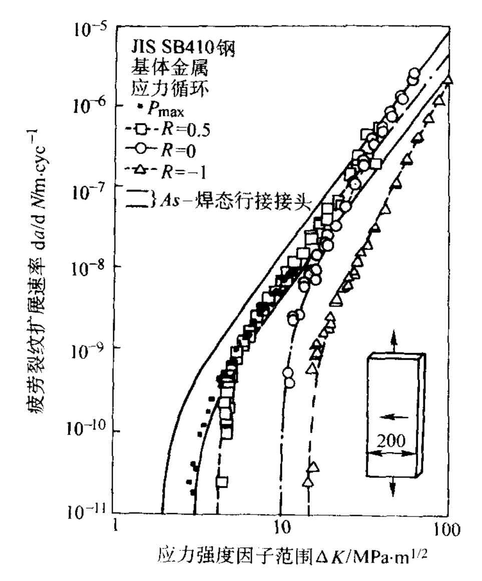


图 9.2-34　不同应力循环比下母材的疲劳裂纹扩展性能



对于铝接头：$c=8.1\times10^{-12}$，$m=3$，$\Delta K_{th}=63-48R$ 但不低于 21 $N/mm^{-3/2}$，其中，$R=K_{min}/K_{max}$。

(2) 疲劳裂纹扩展寿命的估算

估算疲劳裂纹扩展寿命的方法是对裂纹扩展速率进行积分，即对 $da/dN=c\ (\Delta K)^m$ 进行积分。

形成初始尺寸 a_i 的裂纹后，使其扩展到最终尺寸 a_j 所需的循环数可按下式计算：

$$N = N_i + \frac{1}{c}\int_{a_i}^{a_j}\Delta K^{-m}\mathrm{d}a \qquad (9.2\text{-}11)$$

式中，N_i 为是裂纹形成期的循环次数；a_i 为初始裂纹尺寸；a_j 为最终裂纹尺寸。

5　根据试验方法测定焊接构件的疲劳强度

5.1　方法

在某些情况下需要通过疲劳试验来确立元件、结构件或材质的疲劳强度曲线。国际焊接学会推荐采用应力范围 $\Delta\sigma$ 代替应力循环比 R 来表征疲劳载荷，且 $S-N$ 数据应以图形表示。此时，其横坐标为以对数形式示出的循环次数，而纵坐标为以对数示出的应力范围。当应用断裂力学方法时，以对数形式表示的应力强度因子范围为横坐标，而以对数表示的每次循环次数的裂纹扩展量为横坐标来确定裂纹扩展速率数据。

5.2　数据统计

可以采用不同的统计方法，但最常用的方法是具有正负标准差的 $S-N$ 曲线标称值。在大多数场合数据的差别应落在此分散带内。应当说明，该分散带随循环次数的变化而变化。如图 9.2-35 所示。

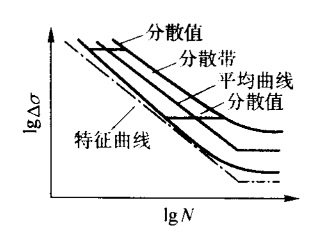


图 9.2-35　$S-N$ 曲线的分散带

试验结果还应当包括特征值（K 指数），该数值是 95% 存活概率和相应 75% 置信度时的标称值，见图 9.2-35。X_K（K 指数）可通过下述程序计算。

1）推导计算所有数据的以 10 为底的对数值，即应力范围 $\Delta\sigma$、循环次数 N、或应力强度因子范围 ΔK 和裂纹扩展速率 da/dN 的对数值。

2）通过线性回归计算下式的 m 指数值和常数 $\lg c$ 值

对于 $S-N$ 曲线　　$m\lg\Delta\sigma+\lg N=\lg c$

对于裂纹扩展速率　　$m\lg\Delta K+\lg da/dN=\lg c$

如果试验数据 $n<15$，或者数据不足，不能保证准确确定 m，可以采用 11 W 推荐的固定的 m 值。即对于焊接接头 $m=3$。

3）通过 m，计算 $\lg c$ 的名义值 X_m 和标准偏差 stdv。

4）假如 X_i 是试验数据的对数值，则计算特征值 X_K 的公式如下：

$$X_m = \frac{\sum X_i}{n}$$

$$\text{stdv} = \sqrt{\frac{\sum(X_m - X_i)^2}{n-1}} \qquad X_k = X_m - K\text{stdv}$$

式中的 K 值如表 9.2-14 所示。

表 9.2-14　计算特征值时的 K 值

n	5	10	15	20	25	30	40	50	100
K	3.5	2.7	2.4	2.3	2.2	2.15	2.05	2.0	1.9

应当说明下述事实，即在小型试样上焊接残余应力一般较低，因此试验结果应予以校正，以便考虑全尺寸构件时的残余应力的影响，这可以通过下述方法获得，即或者在较高的 R 值，例如 $R=0.5$ 下进行试验，或者将 2×10^6 次时的疲劳强度降低，即乘以 80% 系数。

对于裂纹扩展速率的计算，除对标称值外还要给出标准差的结果。

对于常幅交变应力，可用 $\sigma-N$ 曲线或 $\sigma_m-\sigma_a$ 等曲线表示在不同应变水平下达到疲劳破坏时所需要的循环次数。也可以说，只有在一个应力水平下循环加载才能直接用 $\sigma-N$ 曲线来计算接头或构件的寿命。而如果是在两个或多个应力水平下循环加载，也就是说在变幅应力条件下加载，就难以直接用 $\sigma-N$ 曲线来计算构件的寿命。这恰巧又是大多数焊接结构工作条件，因而是焊接结构疲劳设计者必须要解决的一个实际问题。为了计算变幅应力作用下接头的疲劳寿命，除了 $\sigma-N$ 疲劳曲线外，还必须借助于疲劳损伤累积理论。

到目前为止，工程实际中被广泛采用的累积损伤理论是首先由德国人 Palmgrem 于 1924 年和美国人 Miner 于 1945 年提出的线性累积损伤理论，它的基本假定是各级应力引起的疲劳损伤可以分别计算，然后再线性叠加起来，其中某级应力水平 σ_i 造成的疲劳损伤与在该应力水平 σ_i 下所施加的循环数 n_i 和在此应力水平 σ_i 下发生疲劳破坏所需的循环数 N_i 的比值 n_i/N_i 成正比，该比值称为损伤比。

图 9.2-36 为规律性变幅应力的变化规律示意。图中示出变幅中各相关应力水平值 σ_1，σ_2，$\sigma_3\cdots\sigma_n$ 及在它们的作用下各相应的应力循环次数 n_1，n_2，$n_3\cdots n_n$ 和与各应力水平相对应的材料（或构件）发生疲劳破坏所需的循环次数 N_1，N_2，$N_3\cdots N_n$。

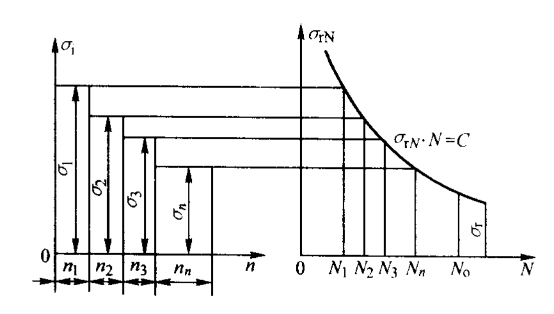


图 9.2-36　规律性变幅应力示意图

据此各相应的损伤比为：

n_1/N_1，n_2/N_2，$n_3/N_3\cdots n_n/N_n$

当各损伤比之和等于 1 时，材料或构件就发生破坏，即：

$$\frac{n_1}{N_1}+\frac{n_2}{N_2}+\frac{n_3}{N_3}+\cdots\frac{n_n}{N_n}=1 \text{ 或} \sum_{i=1}^{n}\frac{n_i}{N_i}=1$$

这就是损伤累积理论表达式。实际构件所承受的载荷谱是随机的、复杂的。在疲劳试验中要直接模拟复杂的随机载荷谱是很困难的，一般需要将其简化，使其比所承受的载荷谱的级数要少，此时所应遵循的原则如下。

① 各级载荷应向造成损伤最严重的若干级上简化，如果要简化成常幅谱，则应向造成损伤最严重的那一级简化。

② 在折算过程中，应使实际承受的载荷谱与简化载荷



谱的总损伤相等。

③ 参考一些研究成果，把低于一定数值不引起损伤的应力水平（或应力范围）予以扣除。

以表 9.2-15 为例说明。

表 9.2-15　简化载荷谱的示例数据

载荷级别	σ_1/MPa	N_1/次	n_1/次	n_i/N_i
1	10 810	1×10^6	2.4×10^3	2.4×10^{-3}
2	12 150	7.5×10^4	2.7×10^2	3.58×10^{-3}
3	13 140	3.1×10^4	5.49×10	1.77×10^{-3}
4	14 070	1.8×10^4	15.6	0.867×10^{-3}
5	15 030	1.2×10^4	6.4	0.533×10^{-3}
6	18 055	8.4×10^3	3.96	0.417×10^{-3}
7	16 810	5.6×10^3	1.23	0.220×10^{-3}
8	17 600	3.7×10^3	0.42	0.114×10^{-3}
9	18 600	2.3×10^3	0.14	0.06×10^{-3}
10	19 540	1.43×10^3	0.05	0.053×10^{-3}

表中第二项是计算出的各级载荷的最大应力 σ_i，第三项是由 $\sigma-N$ 疲劳曲线查出的相应的 N_i 值，第四项是相应各级载荷作用次数 n_1，第五项为相应的损伤比，而 $\sum(n_i/N_i)=10.05\times10^{-3}$。

试验中例如需把此 10 级载荷简化为 4 级，遵循原则 1)，应向损伤比最大的四级简化，由表可见前四级损伤比 n_i/N_i 最大，这四级总共造成的累积损伤为：

$$(2.4+3.58+1.77+0.86)\times10^{-3}=8.62\times10^{-3}$$

而原来十级的总损伤为 10.05×10^{-3}，则两者的比值为 $10.05\times10^{-3}/8.62\times10^{-3}=1.17$

遵循原则 2)，应保证简化后的四级载荷谱与原来承受的十级载荷谱的总损伤相等，因此需将选定的四级的载荷循环次数各加大 1.17 倍。

第 1 级：$2.4\times10^3\times1.17=2\ 808$ 次

第 2 级：$2.7\times10^2\times1.17=316$ 次

第 3 级：$54.9\times10\times1.17=641$ 次

第 4 级：$15.6\times1.17=18$

至此，即把一个十级承受载荷谱简化成为一个与之等效的四级载荷谱。

但是线性累积损伤理论存着严重的缺点，例如该理论并未考虑各级载荷间的相互影响，并忽略了高应力水平引起的残余应力及应变硬化等因素的影响，因此提出的 $\sum n_i/N_i=1$ 仅是一种近似的关系，目前国外国内都对该比值数（$\sum n_i/N_i$）$=1$ 进行研究，如欧洲钢结构规范提出该数值在 0.9 ~ 1 之间变化。

6　疲劳设计

在疲劳设计中主要是采用某种适合的方法来确定和对比疲劳载荷和疲劳强度之间的关系。目前有三种设计方法：一是以 $S-N$ 曲线为基础的方法。它包括标称应力方法、热点应力方法和等效缺口方法。其次是以断裂力学为基础的裂纹扩展速率方法。第三种是构件或元件的直接疲劳试验方法。

此处应着重指出，在考虑疲劳载荷时如果是正应力和剪切应力共同作用，应当考虑它们的共同影响，此时分为三种情况。

一是如果当量标称剪切应力小于 15% 的当量正应力。此时剪切应力可不予以考虑。

二是如果正应力和剪切应力在相位上同步变化，或者最大主应力平面不发生显著变化，可以采用最大主应力范围进行设计。

最后是如果正应力和剪切应力在相位上不一致，在损伤设计中应将其分别考虑，然后叠加，且推荐其损伤比之和 $\sum D<0.5$，即

$$D=\frac{n_n}{N_n}+\frac{n_s}{N_s}<0.5 \qquad (9.2\text{-}12)$$

式中，n_n 为正应力作用下的循环次数；N_n 为正应力作用下发生疲劳破坏的循环次数；n_s 为剪切应力作用下的循环次数；N_s 为剪切应力作用下发生疲劳破坏的循环次数。

还应提及，如果采用断裂力学方法，亦需采用最大主应力计算应力强度因子。

(1) 采用 $S-N$ 曲线的疲劳设计

其基本公式为：

$$\frac{\Delta\sigma_R}{r_m}\geqslant r_F\Delta\sigma_e \qquad (9.2\text{-}13)$$

式中 $\Delta\sigma_R$ 值：ⅡW 规范给出的在给定应力循环次数下，以应力范围定义的疲劳强度可由表 9.2-7，表 9.2-8 和表 9.2-9 查出。应当说明，对变幅疲劳该值应按图 9.2-37 进行一定的修正。

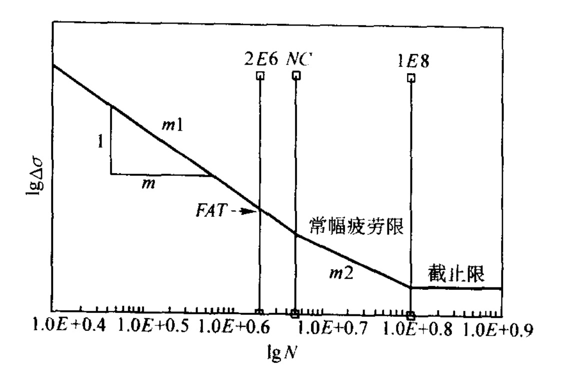


图 9.2-37　变幅疲劳强度的修正图

即自对应 10^7 循环的疲劳限后，斜率 m 由 3 变成 2，10^8 循环后为 $S-N$ 曲线的截止限。

按此图示，根据表 9.2-7 所示接头细节疲劳强度，计算了一些常用质量级别的修正疲劳强度值，示于表 9.2-16 中。

表 9.2-16　恒幅疲劳限及截止限

对常幅疲劳按 Palmgren – Miner 修正后的疲劳极限初始斜率 $m=3.5\times10^6$ 循环时的 $\Delta\sigma_R$，10^8 循环时的截止限

质量级别 (FAT)	N 小于 10^5 循环时的 C 值 ($C<\Delta\sigma_R{}^mN$)	修正后($m=2$)的疲劳限 $\Delta\sigma_R$	N 大于 5×10^6 循环时的 C 值	截止限
180	1.166E13	133	2.052E17	72.8
160	8.192E12	118	1.139E17	64.8
140	5.488E12	103	5.840E16	56.7
125	3.906E12	92.1	3.313E16	50.6
112	2.810E12	82.5	1.913E16	45.3
100	2.000E12	73.7	1.089E16	40.5

续表 9.2-16

质量级别（FAT）	N小于10^5循环时的C值（$C<\Delta\sigma_R{}^m N$）	修正后（$m=2$）的疲劳限$\Delta\sigma_R$	N大于5×10^6循环时的C值	截止限
90	1.458E12	66.3	6.411E15	36.4
80	1.012E12	58.9	3.558E15	32.4
71	7.158E11	52.3	1.959E15	28.7
63	5.001E11	46.4	1.078E15	25.5
56	3.512E11	41.3	5.980E14	22.7
50	2.500E11	36.8	3.393E14	20.2
45	1.823E11	33.2	2.004E14	18.2
40	1.280E11	29.5	1.112E14	16.2
36	9.331E10	26.5	6.565E13	14.6
32	6.554E10	23.6	3.643E13	13.0
28	4.390E10	20.6	1.896E13	11.3
25	3.125E10	18.4	1.060E13	10.1
22	2.130E10	16.2	5.596E12	8.9
20	1.600E10	14.7	3.474E12	8.1
18	1.166E10	13.3	2.052E12	7.3
16	8.129E9	11.8	1.139E12	6.5

$\Delta\sigma_R$：设计应力范围。

应当说明，对于变幅疲劳载荷，需按有关标准规则或根据工作载荷或依赖类似结构的数据编制出载荷谱后，采用Palmgren－Miner规则进行累积损伤计算，即

$$D_d=\frac{n_1}{N_1}+\frac{n_2}{N_2}+\cdots=\sum\frac{n_i}{N_i}\leqslant 1 \tag{9.2-14}$$

式中，n_i载荷谱中设计应力范围为$\Delta\sigma_i$的循环次数；N_i按图9.2-37修正后的$S-N$疲劳强度曲线计算出的在设计应力范围$\Delta\sigma_i$下发生失效的循环次数，在许多场合下可以将其转换成当量的常幅应力范围$\Delta\sigma_E$进行设计计算。

$$\Delta\sigma_E=\frac{\sqrt[m_1]{\sum\left(n_i\Delta\sigma_i^{m_1}\right)+\Delta\sigma_L^{(m_1-m_2)}\cdot\sum\left(n_j\Delta\sigma_j^{m_2}\right)}}{\sum n_i+\sum n_j} \tag{9.2-15}$$

式中，m_1、m_2为$S-N$曲线斜率（图9.2-37）；n_i为在斜率为m_1下的载荷组的循环次数；n_j为在斜率为m_2下的载荷组的循环次数；$\Delta\sigma_L$为常幅疲劳极限。

r_F：考虑疲劳载荷的安全系数，它与构件设计中所选用的载荷及载荷谱、应力循环次数、设计应力谱的常幅化有关。一般设计部门根据结构类型而定。

r_M：考虑疲劳强度的安全系数，它与失效后果等试验数据的分散性有关。在一般情况下，对于合格的质量和经过探伤时构件r_M可选取为1。必要时可按表9.2-17示出值确定。

表 9.2-17 用于疲劳强度的安全系数 r_M 值选取示例

失效后果 \ 设计标准	非无限寿命	无限寿命标准
次要元件破坏	1.0	1.15
全部结构破坏	1.15	1.25
可造成人身伤亡事故	1.25	1.35

（2）断裂力学疲劳设计

在断裂力学的疲劳设计中，一般应用Paris公式$da/dN=C_1(\Delta K)^{m1}$，假如$\Delta K_1>K_{th\cdot 1}$。

但C_1和ΔK_1均需分别考虑疲劳载荷安全系数r_m和疲劳强度安全系数r_F，即

$$C_1=Cr_M^m \tag{9.2-16}$$

$$\Delta K_1=\Delta Kr_F \tag{9.2-17}$$

$$K_{th\cdot 1}=\frac{K_{th}}{r_M} \tag{9.2-18}$$

在应力强度因子较高，达到或接近材料的K_c值时，裂纹扩展速率明显加快，此时建议采用Forman公式表达裂纹扩展速率与应力强度因子等的关系，即

$$da/dN=\frac{C_1\ (\Delta K)^{m1}}{(1-R)\ -\frac{\Delta K_1}{K_c}} \tag{9.2-19}$$

式中，K_c为断裂韧性值；R为应力循环比。

将Paris公式进行积分，可得到断裂发生的循环次数，即

$$N=N_i+\frac{1}{c_1}\int_{a_i}^{a_f}\Delta K^{-m}\,da \tag{9.2-20}$$

初始裂纹a_i可定为0.15 mm。多数资料认为这是合理的，a_f为最终缺陷尺寸，它与选择的断裂模型有关。由于接近断裂时，裂纹扩展加快，其所给的循环次数份额不大。因此a_f的确定不甚严格。将据此计算出的循环次数与所需的循环次数比较。前者必须大于后者。

（3）通过试验方法的疲劳设计

此方法的要点是所设计的构件或结构的循环次数要低于试验得到的该元件或结构的循环寿命，即

$$N_d<\frac{N_T}{F} \tag{9.2-21}$$

式中，N_d为构件或结构可安全工作的设计循环次数；N_T为试样的试验循环寿命的均对数值或第一块试样断裂的循环次数对数值；F为安全系数，它与采用的试验结果数量有关，如表9.2-18和表9.2-19所示。

表 9.2-18 所有试样均破坏时的 F 系数

stdv \ n	2	4	6	8	10	100
0.178	2.99	2.54	2.39	2.32	2.28	2.05
0.200	3.42	2.85	2.66	2.57	2.52	2.24
0.250	4.60	3.70	3.40	3.26	3.18	2.74

表 9.2-19 头一个试样失效的 F 系数

stdv \ n	2	4	6	8	10
0.178	2.72	2.05	1.83	1.55	2.05
0.200	3.08	2.24	1.971	1.80	1.64
0.250	4.01	2.74	2.34	2.09	1.85

标准方差值随待评构件的疲劳循环次数而改变。对于几何形状较为简单构件，在循环次数在$10^4\sim10^5$之间时，可采用的标准方差为0.178；对于复杂构件循环次数小于10^6次时，可采用0.25标准方差值。

如果所有试验试样均破坏，可采用表9.2-18的数值。假如试验是出现一个断裂试样后即停止试验时，可采用表



9.2-19 的数值。此时推荐的 F 系数具有 95%存活率，其置信度为 75%。

7　提高疲劳强度的技术

7.1　综述

一些焊后改善技术可以提高构件疲劳性能，这些技术包括改进焊接接头中焊缝形状，改善残余应力状态或者环境状态，这些改进方法如下。

① 改进焊缝形状方法　机加工或打磨平焊缝；机加工或打磨焊缝焊趾过渡处；由 TIG、等离子、激光重熔焊趾或相变焊条重熔焊趾。

② 改善残余应力状态方法　冲击方法（锤击、超声冲击、喷丸或钢刷冲击）；碾压法；过载法；热处理消除应力。

③ 改善环境状态方法　涂漆；树脂盖层。

7.2　改善方法的应用

所有这些技术应用效果与正确应用这些方法与否和施加载荷有关，其最具效果是在高循环周次低应力区间。同样效果也与材料、结构元件类型以及焊接接头尺寸有关，因此推荐采用疲劳试验验证在感兴趣的疲劳寿命中的方法的效果。

下面给出几种焊后改善方法的效果情况，它们可直接在结构修复中应用，但不推荐在设计中用来延长 $S-N$ 曲线给出的标准设计疲劳寿命。所论述效果只针对标称应力和热点应力方法，不适用于等效缺口应力和断裂力学方法。

所给出的数据应用厚度：

对于钢材，6～150 mm，屈服极限低于 900 MPa

对于铝材，4～50 mm，一般为 AA5000 和 AA6000 系列。

所表述的效果限于工作温度低于蠕变温度，也不用于低周疲劳，标称应力范围 $\Delta\sigma < 1.5\sigma_s$。

所有改善方法只限于疲劳裂纹起源于焊趾处，如图 9.2-38 和图 9.2-39 所示，难以应用于裂纹起源于焊根或焊缝内的缺陷。推荐数据也不适用于自由腐蚀情况。

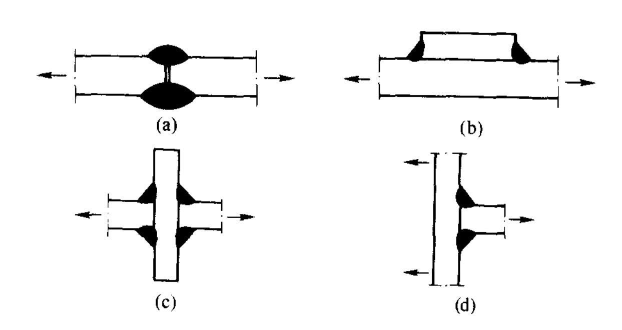


图 9.2-38　改善方法受限的接头形式（裂纹起源于焊根）

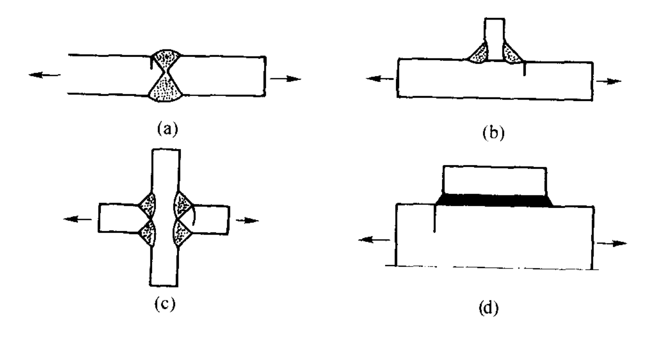


图 9.2-39　适合改善的接头形式

7.3　方法

（1）砂轮打磨

这是一种提高焊接接头疲劳强度的有效方法。国际焊接学会推荐采用高速电力或水力驱动的砂轮，转速为 15 000～40 000 min/r，砂轮由碳－钨材料制作，其直径应保证打磨深度半径应等于或大于 1/4 板厚。图 9.2-40 示出了打磨时砂轮应具有的方位图。国际焊接学会最近的研究表明，对于图 9.2-41 所示的试样经打磨后，其 2×10^6 循环下的标称疲劳强度提高 45%，如果将得到的 199 MPa 疲劳强度标称值换算成相应的特征值（135 MPa）它也高于国际焊接学会的接头细节疲劳强度中的最高的 FAT 值。

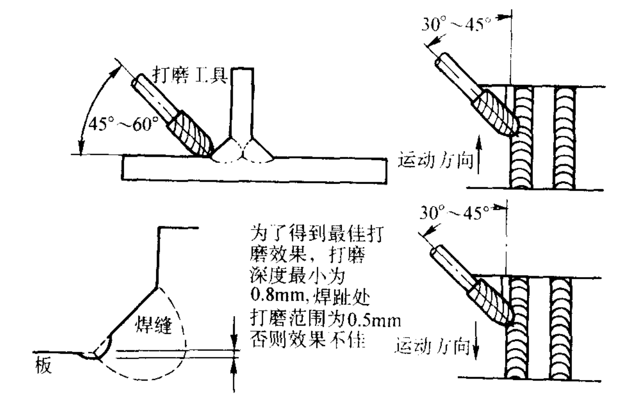


图 9.2-40　国际焊接学会推荐的砂轮打磨方法

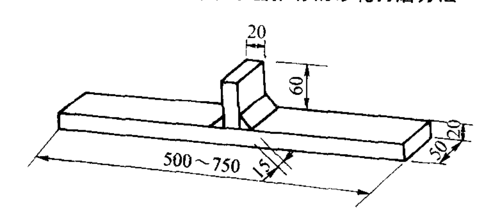


图 9.2-41　所研究的试样形式

（2）锤击法

锤击法是冷加工方法，其作用是在接头焊趾处表面造成压缩应力。因此，本方法的有效性与在焊趾表面产生的塑性变形有关；同时锤击还可以减少存在的缺口尖锐度，因而减少了应力集中。这也是大幅度提高接头疲劳强度的原因。国际焊接学会推荐的气锤压力应为 5～6 Pa。锤头顶部应为 8～12 mm 直径的实体材料。推荐采用 4 次冲击以保证锤击深度达 0.6 mm。图 9.2-42 示出冲击时锤头的方位。

国际焊接学会最近的工作表明，对于图 9.2-41 所示的试样，经锤击后其 2×10^6 循环下接头疲劳强度提高 54%。

喷丸是锤击的另一种形式，也属冷加工的方法。喷丸的效果依赖于喷丸直径尺寸，喷丸尺寸不应过大，以使其能处理微小的缺陷。同时，喷丸尺寸亦不应过小，以保证一定的冷作硬化性能，喷丸一般可在表面上的千分之几毫米的深度上发生作用。

研究结果表明，喷丸能显著地提高高强钢接头的疲劳强度，如图 9.2-43a 所示。可见喷丸对氩弧焊高强钢材料具有突出的效果，其程度甚至高于 TIG 熔修。同时 TIG 熔修配以喷丸锤击，则其效果更为显著。如图 9.2-43b 所示。

（3）电弧（TIG）熔修

国内外的研究均表明，TIG 熔修可大幅度提高焊接接头的疲劳强度，这种方法是用钨极氩弧焊方法（或专用焊条）在焊接接头的过渡区部位重熔一次，使焊缝与基本金属之间形成平滑过渡。减少了应力集中，同时也减少了该部位的微小非金属夹渣物，因而使接头部位的疲劳强度提高。



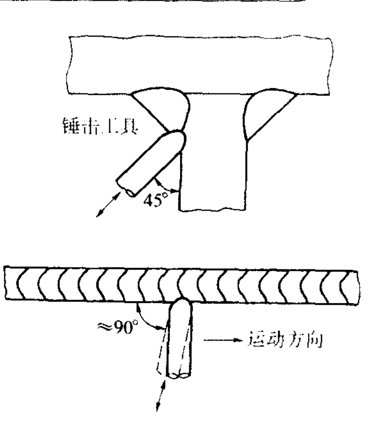


图 9.2-42　冲击时锤头的方位

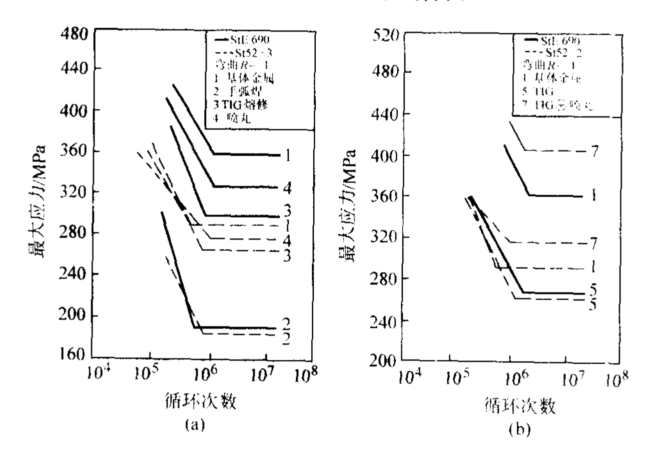


图 9.2-43　喷丸法用于高强钢时有效性举例

重熔工艺要求焊枪一般位于趾焊趾部位 0.5 ~ 1.5 mm 处，并要保持重熔部位洁净。如果事先配以轻微打磨效果更佳。国际焊接学会推荐的规范如表 9.2-20 所示。

表 9.2-20　重熔工艺规范

保护气体	氩气
气流速度/L·min⁻¹	7 ~ 12
喷嘴直径/mm	10 ~ 14
预热（根据需要）/℃	50 ~ 200
钨极直径/mm	3.2 ~ 4.0
电压/V	12 ~ 17
电流/A	160 ~ 250
焊速/mm·min⁻¹	80 ~ 160
热输入能/kJ·min⁻¹	0.5 ~ 2.5

重要的是重熔中发生熄弧时，如何处理重新起弧的方法，因为这势必影响重熔焊道质量、形状，一般推荐重新起弧的最好位置是在焊道弧坑之前的 6 mm 处，或按图 9.2-44 所示的方法重新起弧。表 9.2-21 示出了一些研究者采用该方法后疲劳强度提高的数据。

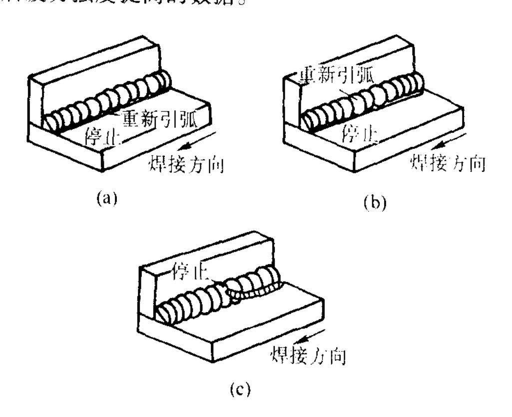


图 9.2-44　TIG 熔修重新起弧技巧

表 9.2-21　TIG 熔修后焊接接头疲劳强度提高的效果

研究者	接头形式	钢　种	试样截面尺寸/mm	循环特性 r	2×10^6 循环下的疲劳强度/MPa（周始状态	加工后）	疲劳强度的提高/%	与母材相比
阿斯尼斯	对接	σ_s = 340 MPa σ_s = 450 MPa σ_s = 674 MPa	70 × 12	-1	80 115 80	120 158 150	50 35 90	— — —
肯约	对接		7 × 2.5	0	52 64	116 181	120 280	0.96 0.86
霍达	对接	HT60 σ_s = 534 MPa	25 × 25	—	185	250	35	0.67
肯约	搭接具有端面焊缝		—	0	86	101	30	—
阿斯尼斯	周边焊的加强板和横加肋连接处	σ_s = 312 MPa σ_s = 341 MPa	70 × 12 70 × 12	-1 -1	95 50	150 90	60 80	—
亚麻诺夫	横加肋的连接 纵加肋的连接	— —	80 × 12 80 × 12	0.3 0.3	188 137	219 158	16 15	—

最近国际焊接学会组织欧洲一些国家和日本的一些焊接研究所，采用统一由英国焊接研究所制备的试样（图 9.2-41）进行了一些改善接头疲劳强度方法有效性的统一性研究，证实经该方法处理后该接头的 2×10^6 循环下的标称疲劳强度提高 58%，如果将得到的 211 MPa 的疲劳强度标称值换算成相应的特征值（K 指数）为 144 MPa。它已高出国际



焊学会的接头细节疲劳强度中的最高的 FAT 值。

(4) 相变焊条熔修

焊条熔修技术是利用一种特殊的焊接材料，在焊缝焊趾部位进行熔修，从而提高焊接接头疲劳性能的方法，是近几年发展起来的一种新方法。

这种特殊的焊接材料为低相变点焊接材料，包括低相变点焊条（low transformation temperature electrodes，LTTE）和低相变点焊丝（low transformation temperature welding wire，LTTW）。它的特点是焊缝金属在冷却过程中，当温度降低到150~250℃的范围内，焊缝金属发生奥氏体向马氏体的组织转变，由于马氏体组织的比容大于奥氏体、铁素体和珠光体等组织的比容，这一组织转变将产生相变体积膨胀。把低相变点焊接材料用于焊趾部位的熔修，熔修焊缝金属马氏体组织转变受到周围金属的约束，使得焊缝金属及其临近部位（主要是焊趾部位）获得残余压缩应力。残余压缩应力改变了焊接接头的应力分布，降低了焊趾部位的应力集中，抑制了焊趾部位微小缺陷产生和扩展，从而提高了焊接接头的疲劳强度和延长焊接结构的疲劳寿命。

为了在焊缝金属及其近缝区获得焊接残余压缩应力，焊缝金属并不需要全部采用低相变点焊接材料施焊，只需要把低相变点焊接材料用于盖面焊缝、近焊趾焊缝或焊趾熔修等表层焊缝（如图9.2-45），就可以使焊接接头的焊趾部位获得残余压缩应力。这种方法也可以用于疲劳裂纹的修复，延长在役焊接结构的使用寿命。低相变点焊接材料的焊接工艺没有特殊要求，简单方便，与其他提高焊接接头疲劳强度的工艺方法相比具有其自身独特的优点和应用场合。

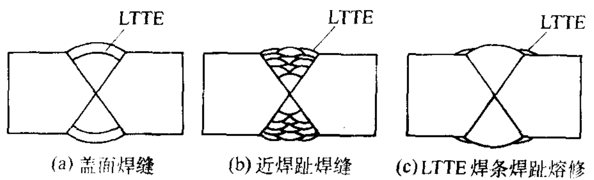
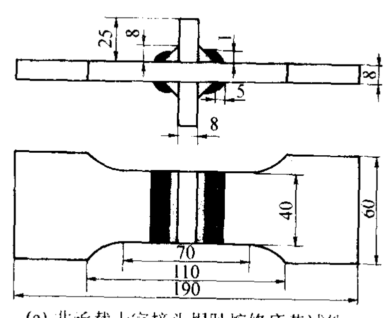


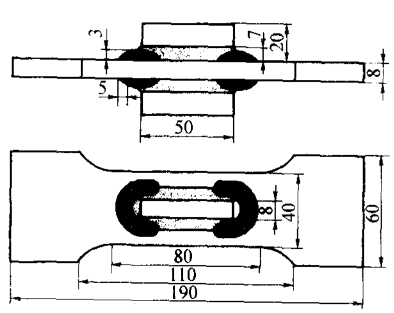
图 9.2-45　低相变点焊接材料应用的三种表层焊缝

天津大学材料学院研制成功低相变点焊接材料，并进行了焊趾熔修试件的疲劳试验。试验采用非承载十字接头试件和纵向环绕角焊缝接头试件，试件形状和尺寸如图9.2-46所示，母材采用 Q235 钢材，基本焊缝采用 E5015 焊条，焊趾熔修焊缝采用 LTTE 焊条。

图9.2-47显示了两种焊接接头的疲劳试验结果。对于试验所用非承载十字接头和纵向环绕角焊缝接头，在 2×10^6 循环次数下，相对于 E5015 焊缝接头，低相变点焊条焊趾熔修接头疲劳强度的分别提高了 17.9%~21.9%和 28.9%~41.9%，与全部采用低相变点焊条接头疲劳强度的改善程度基本相同。

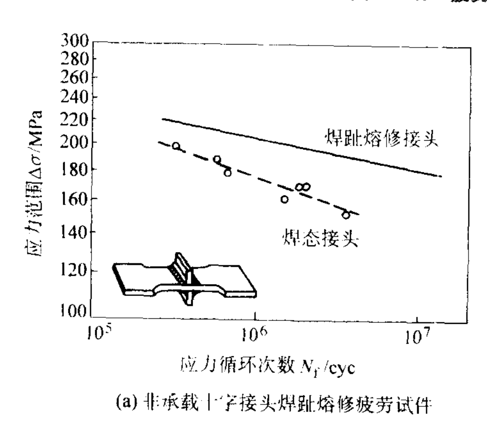


(a) 非承载十字接头焊趾熔修疲劳试件

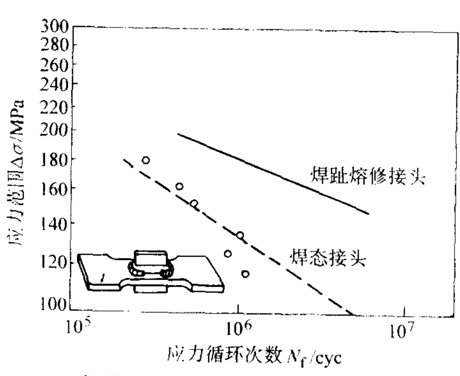


(b) 纵向环绕角焊缝接头焊趾熔修疲劳试件

图 9.2-46　疲劳试件形状和尺寸



(a) 非承载十字接头焊趾熔修疲劳试件



(b) 纵向环绕角焊缝接头焊趾熔修疲劳试件

图 9.2-47　疲劳试验结果

相对于 E5015 焊缝接头，低相变点焊条焊趾熔修接头疲劳寿命有较大提高，依据接头类型和载荷应力不同，其疲劳寿命提高程度在几倍至几十倍。

无论多么复杂的焊接结构或焊缝形式，只需要在疲劳裂纹产生的敏感部位施焊焊一道低相变点焊接材料，就可以提高其疲劳性能，因此很适合于工程实际应用。

(5) 超声冲击法

由于焊趾的应力集中及残余拉伸应力等因素的影响，焊接接头的疲劳强度远低于基体金属的疲劳强度，为此，天津大学焊接工程技术研究所率先在我国开展了使用超声波冲击的方法来提高焊接接头及结构疲劳强度的研究，开发研制成功了压电式超声冲击装置，用来对接头焊趾进行处理，提高其疲劳强度。对比试验表明这种方法的效果极其显著，而且由于其体积小、质量轻、噪声小，不但可以应用于工厂内施工，而且也可以用于大型结构的工地施工条件，应用前景十分广阔。该项目于 2000 年 5 月通过了国家自然科学基金委组织的鉴定，主要研究结果如下。

1) 自行研制了我国第一台超声冲击处理装置，其实物



如图9.2-48所示。该装置与国内外同类设备相比具有如下创新要点：采用了逆变式专用超声波电源及大功率压电陶瓷换能器，使执行机构具有小型化、质量轻以及节能的优点，有利于实际应用；在装置中自行设计和安装了较为精确的频率跟踪系统与恒振速系统，从而使其冲击点痕均匀，工作稳定安全。

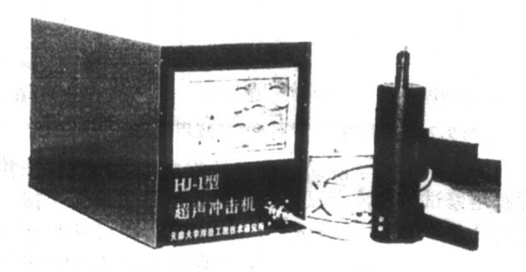


图9.2-48　超声冲击装置实物图

2）进行了不同材料（Q235和16Mn）成百个典型十字和对接焊接接头的超声冲击处理与原始焊态试样的对比疲劳试验，结果如图9.2-49～图9.2-53所示。表明：超声冲击方法对两种材料典型焊接接头的疲劳强度和寿命的改善效果均十分明显。试验统计显示：无论是十字接头还是对接接头，也无论是Q235还是16Mn钢的焊接接头，根据国际焊接学会定义的FAT值（2×10^6循环周次下的疲劳强度）至少提高50%以上。而疲劳寿命的提高可达1个数量级以上。

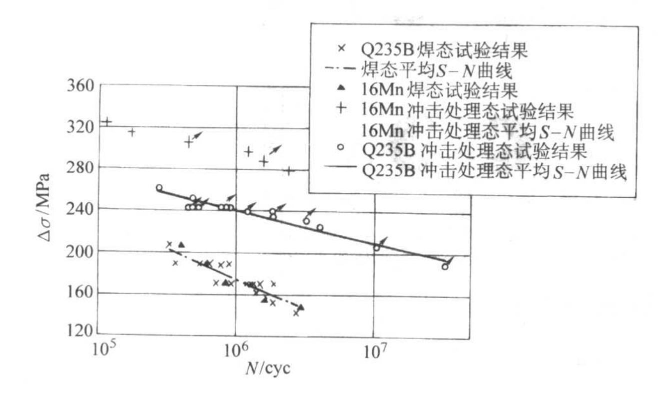


图9.2-49　Q235B和16Mn对接接头的$S-N$曲线（$R=0.1$）

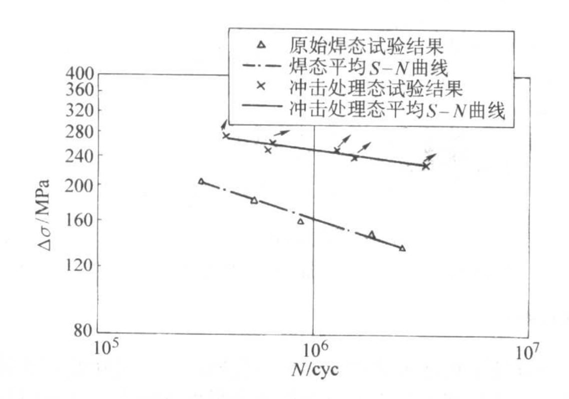


图9.2-50　Q235B十字接头的$S-N$曲线（$R=0.25$）

3）从理论上深入探讨了超声冲击情况下，应力集中、残余应力及表面硬化对提高接头疲劳强度和使用寿命的影响规律，为超声冲击方法的实际应用提供了科学依据。

4）对于焊趾区表层含有咬边等缺陷的焊接接头能够通过超声冲击处理，大幅度延长其疲劳寿命、提高其疲劳强度。经超声冲击处理后，含焊接缺陷的（焊趾处）16Mn钢

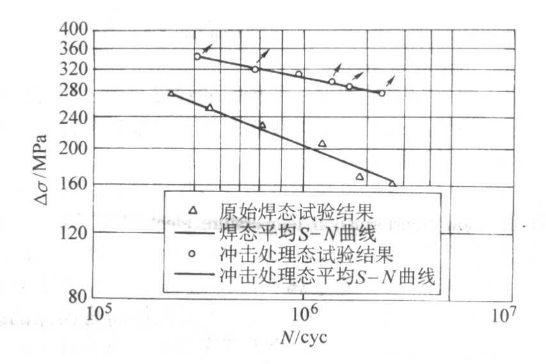


图9.2-51　Q235B十字接头的$S-N$曲线（$R=-0.5$）

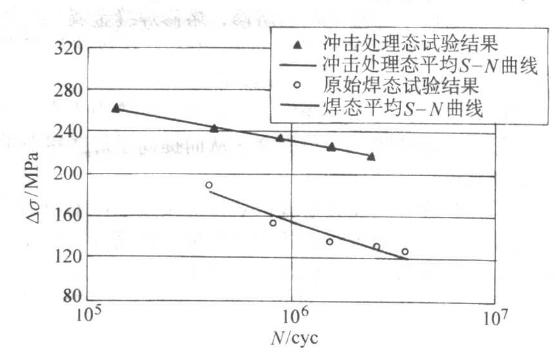


图9.2-52　16Mn十字接头的$S-N$曲线（$R=0.1$）

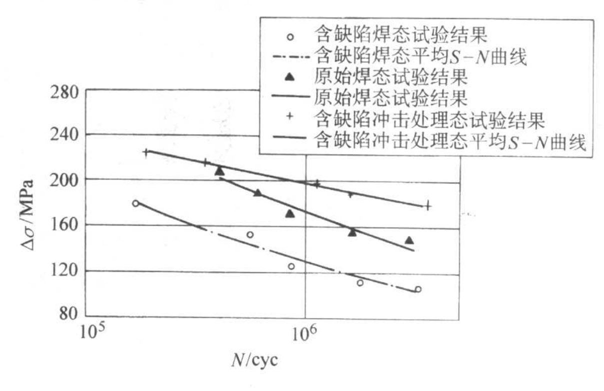


图9.2-53　含缺陷焊接接头对比$S-N$曲线

十字接头的疲劳强度提高66%，疲劳寿命提高10～40倍；与不含焊接缺陷的焊态试件相比，提高疲劳强度32%，提高疲劳寿命2～7倍。虽然咬边缺陷对冲击处理后焊接接头的疲劳性能仍存在部分不利影响（与无缺陷冲击处理焊接接头相比），但能够通过实施超声冲击处理使其疲劳寿命大大超过不含缺陷的原始焊接接头。

（6）碾压法

采用局部加热或挤压可以调节焊接残余应力场、即在应力集中处产生压缩残余应力，因而对提高接头疲劳强度是有利的。这种方法目前限用于纵向非连续焊缝，或具有纵向加肋板的接头。

图9.2-54为具有单面角接板和双面角接板的点状局部加热位置示意及点状局部加热的效果。对于单面角接板，加热位置一般距焊缝约为板宽的1/3，而对于双面角接板情况加热位置为板件中心。这样可以保证在焊缝内产生压缩应力，从而可以提高接头的疲劳强度。表9.2-22示出不同研究者应用该方法得到的效果。图9.2-55说明加热位置的重要性，通过在图9.2-55b所示部位的点状加热，在焊缝端部的缺口处引起了压缩残余应力，结果疲劳强度提高53%；但是当点状加热是在试样中心上进行时，虽然距焊缝端部距



离是相同的，这虽然产生了同样的金相组织影响，但由于残余应力为拉伸残余应力，则所测量到的接头疲劳强度与非处理试样相同。

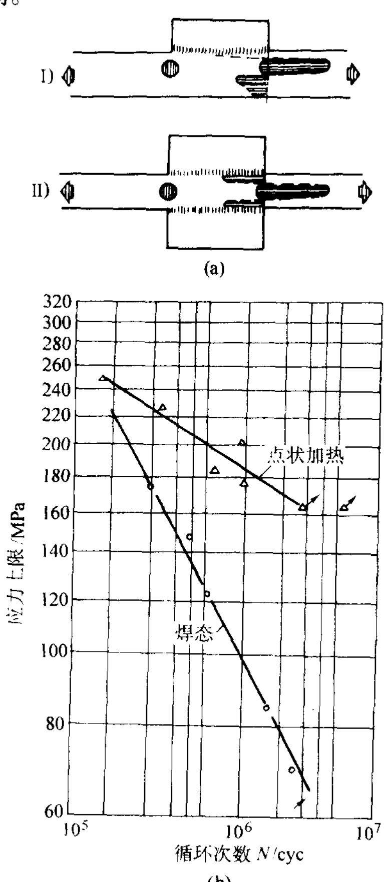


图 9.2-54　点状加热位置与其效果

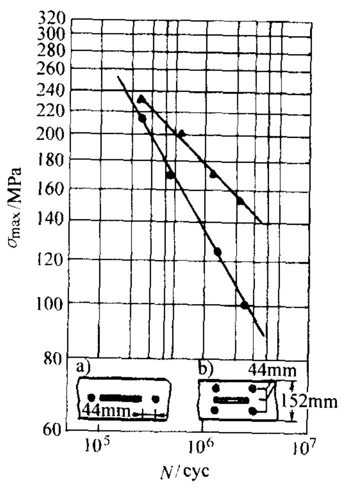


图 9.2-55　点状加热位置对提高疲劳性能的影响

表 9.2-22　2×10^6 循环次数下局部加热的效应

（疲劳强度/MPa）

研究者	单面角焊板			双面角焊板		
	焊态	点状加热后	提高程度/%	焊态	点状加热后	提高程度/%
Puchner	79	169	150	—	—	—
Gurney	69	170	145	62	178	187
Moortgat	—	—	—	74	180	144
Nacher	—	—	—	133	226	70

局部挤压机制与点状加热方法相同，即均是靠压缩残余应力提高接头疲劳强度。但是其作用点是不同的，挤压位置应位于需要产生残余压缩应力的位置，如图 9.2-56 所示。图上同时示出挤压后的残余应力分布。图 9.2-57 示出挤压方法对不同材质产生的效果，显然对于高强钢试样采用挤压法其效果比低碳钢更为显著。

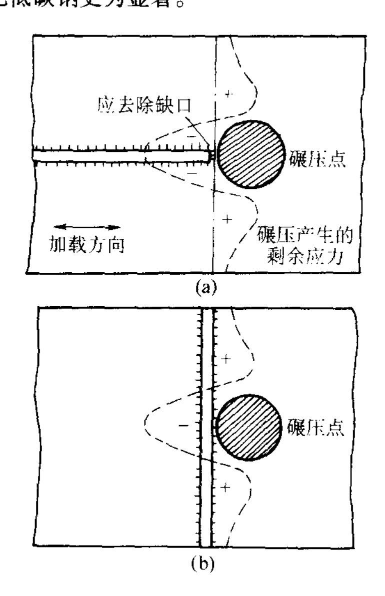


图 9.2-56　横向角焊缝的正确挤压位置

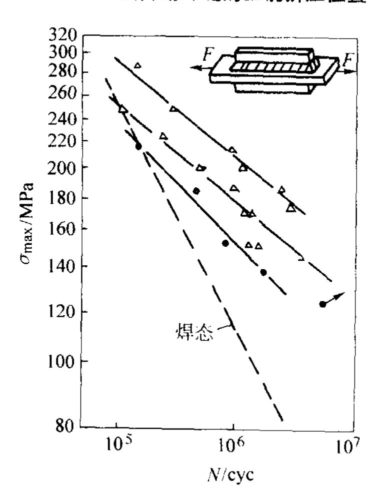


图 9.2-57　挤压对不同材质提高疲劳强度的作用

（7）过载法

假如在含有应力集中的试样上施加拉伸载荷，直到在缺口处发生屈服，并伴有一定的拉伸塑性变形。卸载后，在缺口及其附近发生拉伸塑性变形处将产生压缩应力，而在试样其他截面部位将有与其相平衡的低于屈服点的拉伸应力产生。受此处理的试样，在其随后的疲劳试验中，其应力范围将与原始未施加预过载的试样不同，即显著变小，因此它可以提高焊接接头的疲劳强度。图 9.2-58 是 Harrison 的研究结果，坐标中 S_1 为预过载应力、S_0 为焊态试样的疲劳强度，S_2 为预过载后的接头疲劳强度。表 9.2-23 示出变化预过载数值对提高结构疲劳强度的影响。这一研究结果表明，大型焊接结构（如桥梁、压力容器等）投入运行前需进行一定的预过载试验，这对提高疲劳性能是有利的。

（8）保护措施

采用塑料涂层改善焊接接头疲劳性能是一项新技术，对其机理目前尚不十分明了。在 Gilde 的初始研究工作中，通



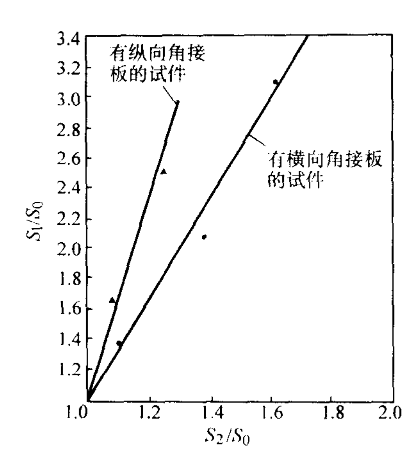


图 9.2-58 预过载在 $r=0$ 条件下对非承载角焊缝疲劳强度的影响

过在软钢缺口上覆以不同类型的塑料，在 2×10^6 循环次数下可提高疲劳强度 200%，而在横向对接焊缝试样上可提高接头疲劳强度 75%；后来他还发现在铝合金焊接接头试样上

表 9.2-23 不同预加载对提高结构疲劳性能的影响

预过载应力/MPa	脉动循环特征 $r=0$		交变循环特征 $r=-1$	
	疲劳强度/MPa	增值/%	疲劳强度/MPa	增值/%
—	0～93	—	±46	—
154	0～100	8	±60	25
232	0～116	25	±80	58

也可获得显著的效果。通过覆盖塑料涂层提高接头疲劳强度的效果已由其他研究者予以证实。

但是并不是所有的塑料都有如此效果。Gilde 指出：只有采用含有填充剂的塑料才是有效的。他认为提高疲劳强度的原因是塑料中的碳键与金属表面相对作用造成的。

英国 Maddox 通过试验发现，当裂纹很短时，涂层对疲劳裂纹扩展速率有显著影响，而当裂纹较长时，其有利影响显著地变小。这似乎说明：塑料的有效效果是由于延长了裂纹萌生期而导致的。

但就目前来说，考虑采用塑料涂层提高实际接头疲劳寿命尚为时过早，在进一步研究以后，此方法可能成为有效的手段。

编写：霍立兴（天津大学）
张　莉（天津大学）
邓彩艳（天津大学）



第 3 章　焊接结构的环境失效

焊接结构与环境介质的作用而引起的金属变质或破坏称为焊接结构的环境失效。焊接结构在腐蚀性介质中的化学、电化学腐蚀，在大气、海洋及土壤中的腐蚀，在使用过程中的高温氧化、脆化、蠕变、热疲劳以及腐蚀磨损等都属于环境失效的范畴。焊接结构的环境失效与材质、介质及制造工艺有关，焊接工艺是保证在环境介质中服役的焊接结构质量的重要因素之一。

脆断、疲劳、应力腐蚀等造成的焊接结构的失效常常给人类带来灾难性的危害和巨大的损失，通过失效分析可以发现和认识失效的性质和原因，从而为在选材、设计和制造过程中防止焊接结构的失效提供可靠的依据。

本章将扼要地介绍常见的焊接结构腐蚀形式及高温氧化、蠕变等由于环境效应所引起的焊接结构的变质和破坏行为，介绍分析焊接结构失效的基本方法。

1　焊接结构的腐蚀失效

1.1　焊接接头腐蚀破坏的基本形式

焊接接头的耐蚀性取决于接头所用材料的性质、所受的应力状态以及所处的环境等三大因素。焊接接头在腐蚀机制上与母材并无根本性的差别，但由于焊接所引起的焊接接头的成分、组织及力学性能的不均匀性的综合影响，使得接头的腐蚀更加复杂，通常接头的耐腐蚀性明显低于母材。

按腐蚀形成的机制可将腐蚀分为化学腐蚀和电化学腐蚀两大类。通常所见到的腐蚀现象，绝大多数是属于电化学性质的，这类腐蚀是在电解质溶液中进行的，它至少包括一个阳极氧化反应和一个阴极还原反应，并伴随有腐蚀电流的产生。

阳极反应过程是金属失去电子、以离子形式进入溶液中，被氧化溶解的过程：

$$[M^{n+}\cdot ne]\longrightarrow M^{n+}+ne$$

阴极反应过程是在阴极表面上介质中的正离子接受从阳极流过来的电子的过程：

$$D^{n+1}+ne\longrightarrow[D^{n+1}\cdot ne]$$

阳极过程和阴极过程是通过经阳极流向阴极的电子流，以及在溶液中阳离子向阴极移动，阴离子向阳极迁移来完成的。

阳极过程、阴极过程及电流流动是构成电化学腐蚀的三个最基本的过程，只要其中一个过程受到阻滞，其他两个过程将不能顺利进行，整个电化学腐蚀过程也难以顺利进行。

金属的腐蚀形态分为全面腐蚀、局部腐蚀及在应力作用下的腐蚀等。全面腐蚀是在整个或大部分金属表面上发生的腐蚀。金属表面各处的腐蚀速度大致相等的全面腐蚀又称为均匀腐蚀。局部腐蚀是腐蚀在金属的某些特定的部位优先进行，并以远大于其他部位的速度发展，这类腐蚀的形态多样，如晶间腐蚀、点蚀、坑蚀及隧道腐蚀等。在应力作用下的腐蚀会加剧，主要的破坏形式有：应力腐蚀破裂和腐蚀疲劳及腐蚀磨损。

全面腐蚀造成的金属损失量往往比局部腐蚀大，但如果知道了腐蚀速度，则由全面腐蚀造成的失效便可以预测，所以全面腐蚀是危害性不大的一种腐蚀形态。而局部腐蚀的预测和防止存在着困难，致使腐蚀破坏往往在没有明显预兆时突然发生，其危害性甚大。

在不同的腐蚀条件下焊接接头的腐蚀形式也不相同。焊接接头常见的腐蚀形式见图 9.3-1，其腐蚀类型及特点如表 9.3-1 所示。

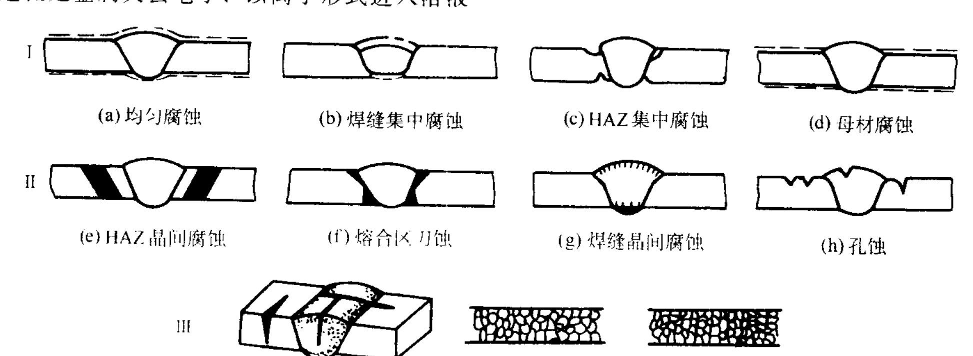


图 9.3-1　焊接接头电化学腐蚀形式

I—全面腐蚀；II—局部腐蚀；III—应力腐蚀

表 9.3-1　焊接接头电化学腐蚀的类型及特点

腐蚀类型		特　点
全面腐蚀		金属及其接头表面全面的均匀腐蚀
局部腐蚀	电偶腐蚀	异质接头以及接头与其他金属电接触引起的腐蚀
	孔　蚀	金属及其接头表面在含卤素等离子的溶液中形成的小孔状腐蚀
	缝隙腐蚀	由各种间隙引起的腐蚀



续表 9.3-1

腐蚀类型		特　点
局部腐蚀	晶间腐蚀	因相析出使晶界附近某种元素贫化或因析出阳极相而引起的沿晶腐蚀
	剥离腐蚀	薄壁母材及其HAZ因沿晶腐蚀而引起的表面层状剥落
	选择腐蚀	合金中较活泼组分优先溶解或分解引起的腐蚀，如黄铜脱锌、铸铁石墨化等
	空泡腐蚀	由流体的空泡作用和腐蚀作用共同引起的破坏，常见于螺旋桨、水轮机叶片等
应力状态下的腐蚀破坏	应力腐蚀	在静应力和腐蚀介质共同作用下引起的破裂
	环境氢脆	阴极反应生成的氢扩散到金属中引起的脆化，可看成是阴极型应力腐蚀
	腐蚀疲劳	在交变应力和腐蚀介质共同作用下引起的疲劳破坏

1.2 焊接结构在自然环境下的腐蚀

(1) 焊接结构在大气中的腐蚀

金属在空气中的腐蚀称为大气腐蚀。大多数焊接结构是在大气条件下工作的，因此，研究焊接结构在大气中的腐蚀规律是很有意义的。

金属在大气中的腐蚀是由于金属表面的水膜及其中的溶解氧引起的，而水膜的厚度受大气湿度的影响。根据大气湿度，通常将大气腐蚀分成三类：干大气腐蚀、潮大气腐蚀和湿大气腐蚀。

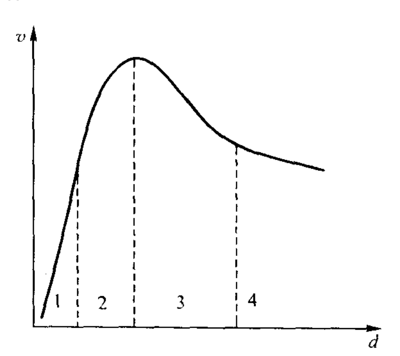


图 9.3-2　大气腐蚀速度 v 与金属表面水膜厚度 d 的关系

1—$d=10^{-6}\sim10^{-5}$ mm；2—$d=10^{-5}\sim10^{-3}$ mm；
3—$d=10^{-3}\sim1$ mm；4—$d>1$ mm

1）干大气腐蚀　置于大气中的金属表面出现凝固态水时的相对大气湿度称临界湿度。

当大气的相对湿度小于临界湿度时的腐蚀称为干大气腐蚀。此时，金属表面没有形成连续的水膜，相当于氧化的情况。干大气腐蚀的机制为氧化。

2）潮的大气腐蚀　当大气的相对湿度大于临界湿度而小于100%时的腐蚀称为潮大气腐蚀。此时，金属表面常有厚度约为 $1\times10^{-5}\sim1\times10^{-3}$ mm 的水膜。这种膜是由于毛细管作用、吸附作用或化学凝聚作用而在金属表面形成的，如金属在下雨天（但不直接被雨淋）时在大气中的腐蚀，就属于潮大气腐蚀。

潮大气腐蚀是一个电化学过程，去极化剂主要是氧。在这种情况下氧容易穿过水膜而到达金属表面，金属的腐蚀速度主要由阳极极化控制，并且它随着水膜的增厚而增加，如图9.3-2的1、2区所示。

3）湿大气腐蚀　当大气相对湿度已达100%或金属直接受到雨淋时的腐蚀称为湿大气腐蚀。此时，金属表面形成厚度约为 $1\times10^{-3}\sim1$ mm 的水膜。

湿大气腐蚀同潮大气腐蚀一样，也是一个电化学腐蚀过程，去极化剂为氧。在这种情况下，水膜较厚，氧的浓度极化，即阴极极化成为腐蚀速度的控制因素，随着水膜的增厚，氧向金属表面扩散的阻力增大，金属腐蚀速度因此也将下降（图9.3-2，3区）。当水膜厚度大于1 mm后，相当于金属全浸入水中的腐蚀，随着水膜厚度的进一步增加，金属的腐蚀速度不再变化（图9.3-2，4区）。

大气的湿度总是变化着的，置于大气中金属的腐蚀条件也在不断地变化，因此，金属在大气中的腐蚀往往不只是单一的一种腐蚀条件下的腐蚀。

影响大气腐蚀的因素主要有：大气的湿度、大气的成分和金属的表面状态。上面已经介绍了大气湿度对金属腐蚀的影响，图9.3-3为大气相对湿度对铁在含0.01% SO_2 的空气中经55天后的腐蚀量的影响。

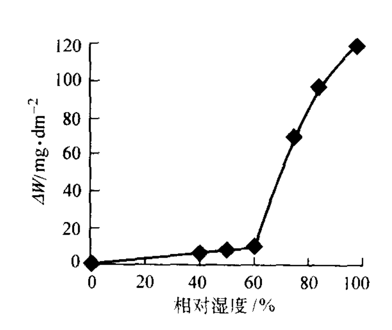


图 9.3-3　相对湿度对铁大气腐蚀速度的影响

当大气中含 SO_2、H_2S、NaCl 及灰尘时，这些物质均会不同程度地加速金属在大气中的腐蚀。图9.3-4表明了空气中的 SO_2、$(NH_4)_2SO_4$ 及烟尘等对钢大气腐蚀量的影响。SO_2 会与大气中的氧和水作用生成 H_2SO_4，因此煤和石油燃烧中产生的 SO_2 是特别有害的，它会加速金属的大气腐蚀。

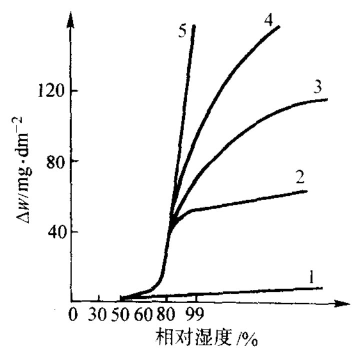


图 9.3-4　抛光钢表面腐蚀量与相对湿度的关系

1—纯净空气；2—有 $(NH_4)_2SO_4$ 颗粒，无 SO_2；
3—仅有 0.01% SO_2，没有颗粒；4— $(NH_4)_2SO_4$ 颗粒 + 0.01% SO_2；
5—烟粒 + 0.01% SO_2

金属表面的粗糙度对金属的大气腐蚀也有很大的影响，当金属的表面不光洁时，增加了金属表面的毛细效应、吸附



效应和凝聚效应，因此降低金属表面的粗糙度也能提高大气中金属的腐蚀阻力。

干燥和净化大气及降低金属表面的粗糙度是防止大气腐蚀的有效途径；在潮的大气腐蚀情况下，向金属中加入易钝化的合金元素（如铬、铝、硅等）或者加入可促进金属钝化的正金属元素（如铜、钯等）可以防止大气腐蚀，在金属所涂的油漆中加钝化剂及对金属进行电化学保护等方法也可防止大气腐蚀；在湿大气情况下，采用金属表面覆层，增加体系电阻等方法可防止大气腐蚀。

（2）焊接结构在海水中的腐蚀

海水是天然的电解质，在海水中工作的金属构件大多数都会受到海水的腐蚀。如表9.3-2所示，通常海水中含有多种盐，总含量约为3%，其中NaCl的含量最多，占总量的77.8%，因而海水是中性的，pH值约为8左右，海水中有溶解氧，可达12×10^{-6}，所以海水腐蚀属于氧去极化的电化学腐蚀。

海水中氯化物总量很多，且多数可电离。所以海水中Cl^-含量很多，电导率高，这就使得在海水腐蚀条件下，金属表面难以形成稳定的钝态，产生孔蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀等局部腐蚀的倾向高。

表9.3-2　海水中主要盐类的含量

成　分	100 g海水中含盐的克数	占盐度的百分数/%
氯化钠	2.721 3	77.8
氯化镁	0.380 7	10.9
硫酸镁	0.165 8	4.7
硫酸钙	0.126 0	3.6
硫酸钾	0.086 3	2.5
硫酸钙	0.012 3	0.3
溴化镁	0.007 6	0.2
合　计	3.5	100

海水是含多种盐的中性溶液，并且还含有微生物、溶解的气体、悬浮泥砂、腐败的有机物等，所以，化学因素、物理因素和生物因素均影响着腐蚀速度，它比单纯的盐水溶液腐蚀要复杂得多。影响海水腐蚀速度的主要因素有：含氧量、盐类及其浓度、温度、海生物、海水流速等。

对于在海水中不能建立钝态的钢、铜等，降低海水中的含氧量能减小其腐蚀速度。海水表面与大气接触，所含的氧较多，因此腐蚀速度较大；随着海水深度的增加，含氧量会减少，故腐蚀速度也减小。

（3）焊接结构在土壤中的腐蚀

埋设在地下的油、气、水管线及电缆等在土壤中常会发生腐蚀，而使管线漏油、漏气、漏水，或使电讯设施发生故障等。所以应对土壤腐蚀引起足够的重视。

通常土壤中含有一定量的水和氧，所以土壤腐蚀属于氧去极化的电化学腐蚀。只有在强酸性土壤中才会发生氢去极化腐蚀。如果土壤干燥而疏松，则土壤腐蚀与大气腐蚀相近。

影响土壤腐蚀的因素主要有土壤的导电性，土壤中的含氧量，土壤的酸度和土壤中的细菌等。

土壤的导电性与土壤的孔隙度、水分及溶解的盐类有关。土壤的孔隙度大（如砂土），水的渗透力强，土壤不易保存水分；而孔隙度小的土壤（如黏土），水的渗透力差，水分多，可溶性盐类易溶于水，成为电解质，从而使导电性增加，腐蚀速度增加。

土壤中的氧是从地表渗进土壤颗粒缝隙间的，在干燥的砂土中，由于氧容易渗透，故含氧量多；在潮湿而致密的黏土中，因氧渗透困难，故含氧量少。在温度和结构不同的土壤中，含氧量相差可达几百倍。

大部分土壤的pH值为6～7.5，即呈中性。但也有pH为7.5～9.5的盐碱土和pH为3～6的酸性土。一般认为pH≤4的土壤可能发生氢去极化的电化学腐蚀，土壤腐蚀的速度较大。当土壤中含有大量的有机盐时，其pH值虽接近中性，但腐蚀性仍很强。

当土壤中有细菌，如硫酸盐还原菌、硫杆菌、铁杆菌等时，均能促进钢铁结构的土壤腐蚀速度。

1.3　焊接结构的局部腐蚀

局部腐蚀的共同特点是腐蚀在金属的某些特定部位优先进行，并以远大于其他部分的腐蚀速度向纵深发展。由于焊接接头存在着严重的物理、化学、力学及组织不均匀性，因此，局部腐蚀是焊接结构的主要腐蚀形式。本小节介绍在无应力作用下的局部腐蚀形式，应力作用下的局部腐蚀将在下一节中介绍。

（1）电偶腐蚀

两种电极电位（腐蚀电位）不同的金属在电解液中接触时，金属间便形成了电偶腐蚀电池，从而发生电偶腐蚀，亦称接触腐蚀或双金属腐蚀。发生电偶腐蚀时，电位低的金属将加速腐蚀，电位高的金属则受到保护。

金属在不同介质中的腐蚀电位是不相同的。在某一介质中电位愈负的金属愈易成为阳极而被腐蚀，电位愈正的金属则愈易成为阴极而不易被腐蚀。除了材质因素外，电偶腐蚀还受介质的性质、成分、温度、流速及金属的表面状况等因素的影响。常用金属材料在海水中的腐蚀电位序见表9.3-3。

表9.3-3　常用金属及合金在海水中的腐蚀电位序
（按正电性逐渐增强、负电性逐渐减弱顺序）

Mg	304不锈钢（活态）	Mn青铜	Ag
Zn	316不锈钢（活态）	Si青铜	410不锈钢（钝态）
Al	黄铜（Zn15%）	Sn青铜	430不锈钢（钝态）
Al合金	黄铜（Zn35%）	Cu90－Ni10合金	304不锈钢（钝态）
低碳钢	Sn	Pb	316不锈钢（钝态）
低合金钢	Cu	70Ni－30Fe合金	蒙乃尔合金
铸铁	Al青铜	70Cu－30Ni合金	Ti
410不锈钢（活态）	焊锡（Sn50－Pb50）	银铜钎料	Pb
400不锈钢（活态）	Al黄铜	Ni	石墨

在焊接接头处易产生电偶腐蚀，产生腐蚀的原因及防止方法如下。

1）由不同电位的母材组成的异质接头，通过对焊接材料的适当选择使焊缝的腐蚀电位介于两母材之间，可减缓腐蚀，但不能完全避免。

2）在同质接头中，焊缝的腐蚀电位与母材有明显差异。例如，用18－8焊条焊接的Cr13不锈钢接头，在60℃16% H_2SO_4溶液中酸洗后就会在焊缝附近的母材上产生严重的电偶腐蚀。如改用Cr13型焊条，或用它在焊缝表面堆焊保护层，这类腐蚀就可基本防止。

3）焊接接头的组织不均匀性也会引起电偶腐蚀。低碳钢焊缝中的柱状晶、气孔、夹杂物、珠光体偏析，尤其是过



热区的粗大组织，都能增大腐蚀倾向。焊后对接头进行相变热处理，可显著改善接头的耐蚀性。低碳钢焊接接头的这种腐蚀倾向在强介质（如3% H_2SO_4 溶液）中尤其明显，而在雨水、海水中就小得多，高强钢特别是调质钢焊接接头的熔合区更为敏感，在海水中更易引起孔蚀。

4）焊缝与母材的相对面积比也会影响电偶腐蚀。若焊缝电位负于母材过大，即形成活性较大的小阳极、大阴极的宏观电池，焊缝将优先腐蚀；反之，则在焊缝熔合区的母材侧将优先腐蚀，见图9.3-5。因此，焊缝电位过负以及狭窄的焊缝有可能因集中腐蚀而导致接头过早破坏。

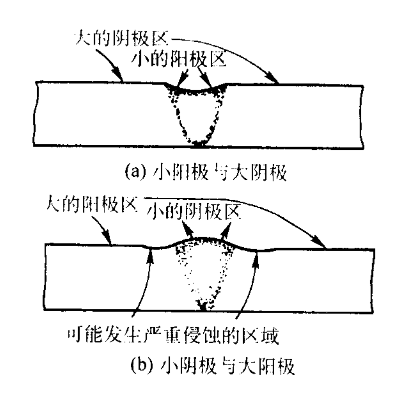


图9.3-5　焊缝与母材的电位差引起的电偶腐蚀

5）直接暴露于介质中的薄壁结构焊接热影响区的电偶腐蚀（见图9.3-6）。解决办法是增大结构壁厚；或当壁厚＜4 mm时，在其外侧加入垫板，并采用小电流焊接，以减小热影响区的深度。

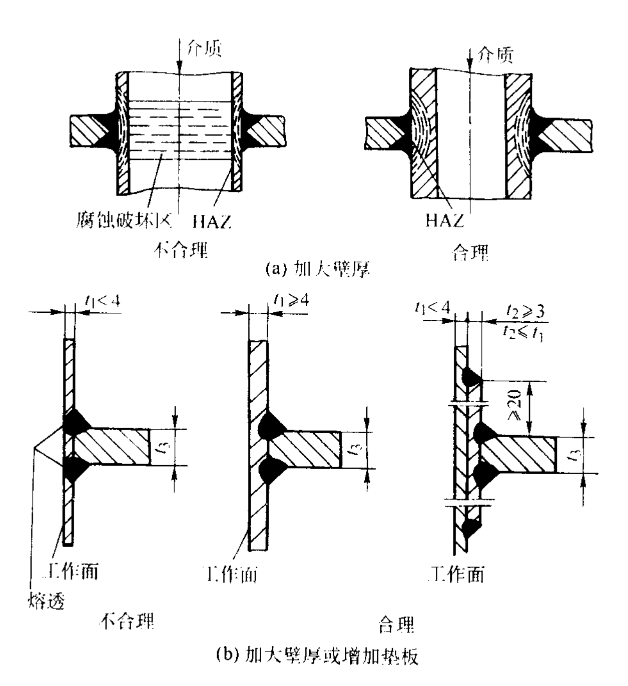


图9.3-6　防止薄壁结构热影响区直接与介质接触引起的电偶腐蚀

t_1、t_2—例如铬镍奥氏体钢；t_3—非合金钢

6）与其他金属间形成的电偶腐蚀。应尽量不用电位与结构主体材料相差太大的零部件和紧固件，如钢结构上的铜螺钉。

（2）孔蚀

在金属表面的某一局部出现向深处发展的腐蚀小孔，而其他地方不被腐蚀或者腐蚀轻微的腐蚀形态称为小孔腐蚀，简称孔蚀、点蚀或坑蚀。小孔的直径一般等于或小于其深度。孔蚀的破坏性和隐患性很大，它不仅会造成设备的穿孔破坏，而且通常是引发其他局部腐蚀形态的起源。

表面有氧化膜或钝化膜的金属，如不锈钢、铝及其合金、钛及其合金等在含有 Cl^- 等卤素离子、$S_2O_3^{2-}$ 等溶液中，都可能产生孔蚀。当金属表面的氧化膜或钝化膜由于机械损伤或组织缺陷等原因引起局部破损时，裸露的金属在介质中与周围的钝态金属形成活化－钝化腐蚀电池，并形成蚀点即孔蚀核心。蚀点一旦形成，有害离子易于在其上面附着，从而形成所谓的闭塞电池，由于孔内、外物质交换困难，有害离子会更加浓缩，阳极溶解速度进一步加快，于是，腐蚀便不断向纵深发展，形成内腔形状不一的蚀孔。

美国ASTM Practice G46－76标准按蚀孔的分布密度、尺寸及深度将孔蚀分为1～5五个等级，见图9.3-7；按蚀孔截面形状将孔蚀分为如图9.3-8所示几种类型。

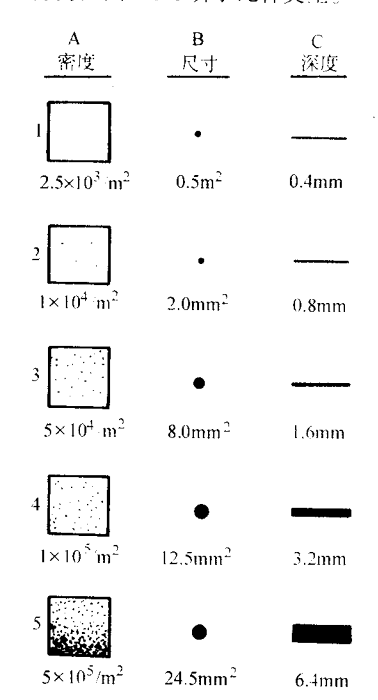


图9.3-7　孔蚀评级标准

（ASTM Practice G46－76）

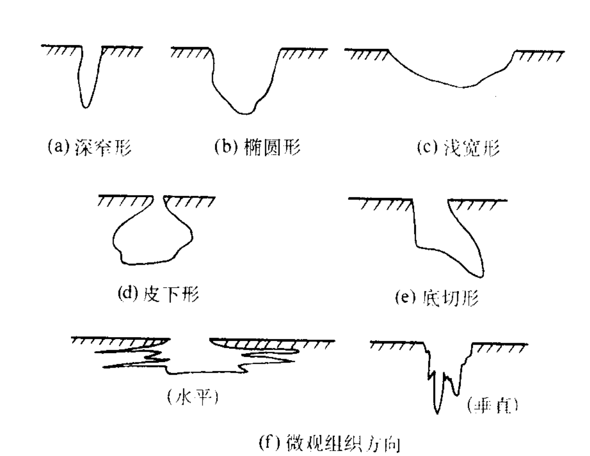


图9.3-8　孔蚀形态分类（ASTM Practice G46－76）

在静止的介质中易于产生孔蚀，因此，凡是影响介质流动的部位，如结构设计上的死角、各种表面损伤和焊接缺陷



（粗糙的焊波、气孔、裂纹、咬边、未焊透等）以及破坏表面钝化膜和引起表面粗糙的成形工艺，都有利于孔蚀的产生。此外，焊接残余应力也对孔蚀有促进作用。

孔蚀产生与否取决于局部破损的钝化膜的自修复能力。利用滞后技术可在金属阳极极化曲线上测出孔蚀电位（击穿电位）和不产生孔蚀的保护电位（自钝化电位）。保护电位反映了蚀孔重新钝化的难易，保护电位愈接近孔蚀电位，说明钝化膜自修复的能力愈强，愈不易产生孔蚀。

金属的孔蚀倾向与金属的成分、组织、冶金质量等因素以及金属的表面状态有关，还与介质的成分、pH值、温度、流速有关。

在实际腐蚀破坏中，最常见到的是不锈钢和铝及铝合金的孔蚀破坏。马氏体不锈钢及铁素体不锈钢的孔蚀倾向比奥氏体不锈钢大。Mo能有效地提高不锈钢焊缝的抗孔蚀和抗缝隙腐蚀的能力，此外，在不锈钢中加入Cr、Ni、V等元素，或当钢中有Cr时再加入Mo、V、Si等元素可提高不锈钢的抗孔蚀能力。

（3）缝隙腐蚀

在介质中，由于金属与金属或金属与非金属之间存在很小的缝隙而形成闭塞电池，缝内介质处于滞流状态，加速了缝内金属的腐蚀，这种腐蚀形式称为缝隙腐蚀。引起缝隙腐蚀的缝宽一般为0.025～0.1mm。缝宽过窄时，介质进不去，不会形成缝隙腐蚀；缝宽大于0.1mm时，缝内介质不易形成滞流，故也不会形成缝隙腐蚀。

图9.3-9为低碳钢焊缝咬边处在NaCl溶液中形成缝隙腐蚀的电化学过程示意。一方面因氧难以进入而在缝隙内形成氧浓差电池，另一方面因缝内Fe^{2+}、Fe^{3+}不断增多而引起金属离子浓差电池，吸收更多的负离子Cl^-进入缝内，并通过水解作用使缝内pH下降，造成缝内溶液的局部酸化，从而加剧其腐蚀过程。

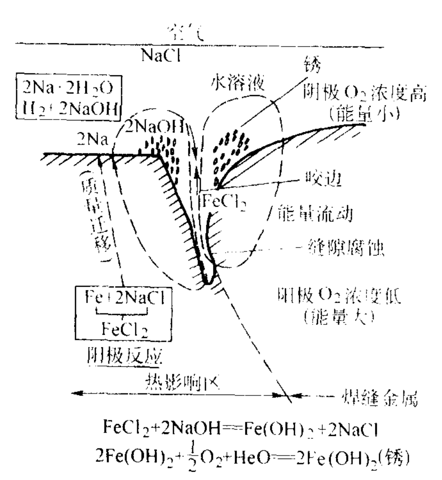


图9.3-9 低碳钢焊缝咬边处在NaCl溶液中形成缝隙腐蚀过程示意图

影响孔蚀的因素及控制孔蚀的方法均适用于缝隙腐蚀。

为防止缝隙腐蚀，焊接时应采取如下措施。

1）注意结构设计的合理性 避免断续焊、单面焊、搭接焊、未焊透等引起的缝隙，难以避免的缝隙应加以密封，见图9.3-10。图中还表示出了大型容器与支架连接处的改进设计。点焊和缝焊接头也极易产生缝隙腐蚀，应尽量不用。

2）严格控制工艺 避免各种焊接缺陷以及破坏结构表面钝化膜和表面光洁的操作。

3）选用耐蚀性高的结构材料和相应的焊接材料 例如：钛在海水中有很强的抗缝隙腐蚀能力，Cr18Ni12Mo2Ti、Cr18Ni9Ti、Cr18Ni12Mo3Ti等不锈钢在低氧酸性介质中不易活化，Cu－Ni、Cu－Sn、Cu－Zn等铜基合金在许多介质中都有较高的耐缝蚀性。

4）必要时对结构进行阴极保护。

（4）晶间腐蚀

沿着金属的晶粒边界或晶界的邻近区域发展的腐蚀称为晶间腐蚀。晶间腐蚀时，金属表面腐蚀轻微，而内部因腐蚀已造成了沿晶的网络状裂纹，使金属的强度大大降低。此外，晶间腐蚀往往会成为应力腐蚀的先导。

产生晶间腐蚀的根本原因在于：由于某种原因使晶界的物理化学状态发生了变化，从而引起晶界的加速腐蚀。

总的来说，引起晶间腐蚀的具体原因有：第二相沿晶析出导致晶界附近某一电位较正的成分贫化。例如，18－8钢因析出$Cr_{23}C_6$或$(Cr,Fe)_{23}C_6$而形成电位较负的贫铬区；硬铝因析出$CuAl_2$而形成贫铜区。沿晶析出电位较负的阳极相。例如，Al－Zn－Mg合金析出连续的$MgZn_2$相；Al－Mg合金析出Al_3Mg_2相；Al－Si合金析出Mg_2Si相；铁素体钢析出亚稳定碳化物等。这些析出物本身就是不耐蚀的。杂质或溶质原子沿晶界偏聚形成低电位区。例如，Al中的Fe；Cu－Al合金中的Al；Cu－P合金中的P。位错、空位等晶体缺陷沿晶界形成松散的过渡组织。相变应力引起的沿晶阳极区。

1）奥氏体不锈钢焊接接头的晶间腐蚀 固溶态奥氏体不锈钢经焊接或热加工后，晶间腐蚀倾向常常大为提高。图9.3-11为18－8钢产生晶间腐蚀的温度与加热时间的关系（图中的阴影部分），从图中可以看出，出现晶间腐蚀的敏感温度为450～850℃，此温度范围称为18－8钢的敏化温度，敏化温度随含碳量的增加而升高，敏化时间随含碳量的降低而延长。

奥氏体不锈钢的晶间腐蚀可以用贫铬理论来解释：在敏化温度下保温时，奥氏体中的碳会向晶界扩散，并与Cr形成碳化物，而离晶界稍远处的Cr因扩散速度慢不能快速地向晶界附近扩散，从而在晶界附近形成贫铬区（Cr＜12.5%），使该区的电极电位发生突跳性的降低。于是，在介质中晶界及其附近金属便成为了阳极，晶内金属为阴极，形成了大阴极－小阳极腐蚀电池，从而沿贫铬区构成了腐蚀通道。

焊接接头中可能出现晶间腐蚀的部位有三处，即母材敏化区、焊缝区和出现刀蚀的过热区，如图9.3-12所示。

母材敏化区腐蚀多发生在不含有Ti、Nb等稳定化元素的普通18－8钢接头中，稳定化型和超低碳型不锈钢一般不会发生。焊接条件下的实际敏化温度比普通加热时高，约为600～1000℃。

为防止焊缝区的晶间腐蚀，首先要尽量降低含碳量，或添加强碳化物形成元素Ti或Nb，其含量按Ti/(C－0.002)≥8.5%～9.5%及Nb＝8C≤15%确定，其中C为焊缝中的含碳量；其次是控制焊缝组织，当焊缝中含有5%左右的一次铁素体δ相时，可以消除单一γ组织形成的腐蚀通道，而过多的δ相反而会引起选择腐蚀和σ相析出脆化。

刀状腐蚀是焊接接头特殊的一种晶间腐蚀形式，一般常见于稳定化型18－8钢的熔合区。刀蚀的形成与先前以碳化物形态存在于晶界的Ti、Nb等在过热区的高温（1200℃以上）下重新分解并固溶于γ中去，在随后的中温敏化过程中起不到稳定化作用而导致贫铬区的出现有关，也与碳在熔合区两侧的扩散有关。为防止刀蚀，最好采用超低碳不锈钢；如用亚稳定化型不锈钢，则应限制其含碳量在0.06%以下。双面焊时应使面对介质的一侧最后焊接；否则应适当调节焊接热规范，使第二面焊缝的敏化温度区不致正好落在第一面焊缝的过热区上，见图9.3-13。



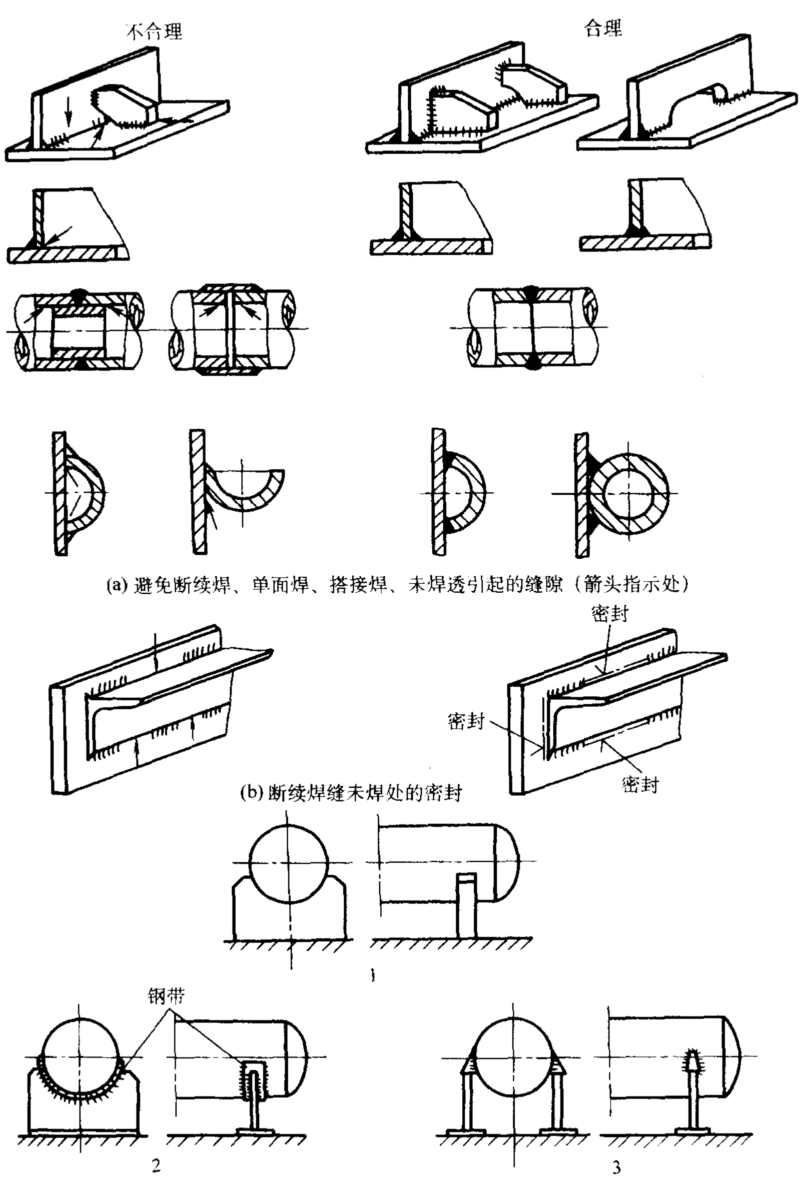


图 9.3-10　防止缝隙腐蚀的结构设计

1—松动放置的容器与鞍形架之间形成缝隙；2—加钢带焊接；3—四点焊接支架可减小支承面

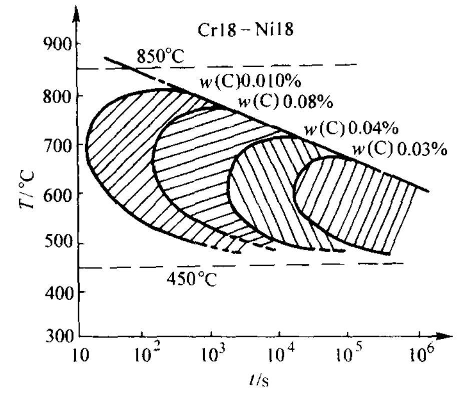


图 9.3-11　18-8 钢晶间腐蚀的敏化温度-时间曲线

防止奥氏体不锈钢焊接接头晶间腐蚀的途径主要如下。

① 选材　尽量采用超低碳不锈钢（如 00Cr18Ni11、00Cr17Ni13Mo3 等），配合相应的超低碳焊接材料（如焊条 E00-19-10-16、E00-18-12Mo2-16，即奥 002、奥 022 等）。或采用稳定化型不锈钢（如 1Cr18Ni9Ti、1Cr18Ni12Mo3Ti 等），配合相应焊接材料（如焊条 E0-19-10Nb-16、E0-19-10Nb-15，即奥 132、奥 137 等）。也可用含适量 δ 相的不锈钢和相应的焊材（如奥 122 焊条等）。

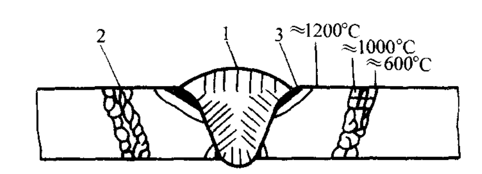


图 9.3-12　18-8 钢焊接接头可能出现晶间腐蚀的部位

1—焊缝区；2—母材敏化区；3—刀蚀区

② 制造工艺　严格控制焊接工艺的各个环节，力求快速冷却以缩短焊接接头在敏化温度的停留时间，使接头保持



一次稳定状态。保护好表面钝化膜和表面粗糙度，必要时对结构表面进行酸洗、钝化和抛光处理。

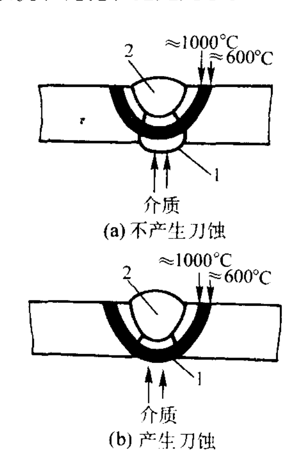


图 9.3-13 双面焊对刀蚀的影响
1—第一道焊缝（先焊）；2—第二道焊缝（后焊）

③ 焊后热处理 上述措施达不到要求时，可进行整体固溶处理，即对 18-8 钢采用 1 050～1 150℃水淬处理，使接头回复到一次稳定状态。也可以进行较低温度的稳定化处理，即 850～900℃加热 2～4 h 后空冷，使接头进入二次稳定状态。

2）铁素体不锈钢焊接接头的晶间腐蚀 高铬铁素体不锈钢在 900℃以上加热后空冷或水冷，在许多介质中都会产生晶间腐蚀。在高温加热时，晶界上析出 Cr_7C_3 型碳化物，使晶界附近贫铬是引起晶间腐蚀的根本原因。除碳外，N 也是有害元素，C、N 在 δ 相中的溶解度比 γ 相中低，加上 Cr 的扩散速度在 δ 中比 γ 中快得多，所以即使由高温快速冷却，也不能避免碳化物或氮化物的沿晶析出。

铁素体不锈钢焊接接头，在熔合线附近会引起晶间腐蚀，焊后缓冷或焊后采用加热到 650～850℃的退火处理可以消除或降低晶间腐蚀倾向。

3）双相不锈钢焊接接头的晶间腐蚀 组织为 γ+δ 的双相不锈钢，特别是加 Mo 的双相钢，具有比相近含碳量的奥氏体不锈钢高得多的抗晶间腐蚀能力，在退火状态下也有良好的抗应力腐蚀性能。属于这类钢的有 AISI 319、326（Cr18Ni6Mo2、Cr26Ni6Ti）等；国产双相钢：Cr18Mn10Ni5Mo3、Cr17Mn14Mo2N。这类钢如采用双相钢焊接材料可避免刀蚀，但焊缝中 δ 相呈连续网状分布时，在氧化性和还原性介质中的耐蚀性将受到显著影响。

4）晶间腐蚀倾向的评定方法 国标 GB/T 4334—2000 规定的不锈钢晶间腐蚀倾向试验方法见表 9.3-4。其中草酸法是根据电解侵蚀后试样表面的结构状况来评定的，这是一种快速筛选方法；硫酸-硫酸铜法以弯曲试验后是否出现裂纹为评定依据；其他的方法则是根据每周期的试样失重量来评定的。有关细则在标准中有详细规定。此外，还可以用金相法，即根据沿晶腐蚀深度评定；也可用电化学法，即用阳极极化曲线上的极化率等有关参数作判据。

表 9.3-4 不锈钢晶间腐蚀倾向试验方法

试验方法	标准号	试验溶液	试验条件	溶液量
草酸法	GB 4334.1	$H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$（HG3-988-76，AR）100 g 蒸馏水 900 mL	20～50℃，1A/cm²，1.5 min	
硫酸-硫酸铁法	GB 4334.2	50% H_2SO_4（GB 625-77，AR）600 mL $Fe_2(SO_4)_3$ 25 g	沸腾 120 h	按试样表面积计算，每 1 cm² 不少于 20 mL
硝酸法	GB 4334.3	65%±0.2% HNO_3（GB 626-65，AR）	沸腾 3～5 个周期，每周期 48 h	按试样表面积计算，每 1 cm² 不少于 20 mL
硝酸-氢氟酸法	GB 4334.4	10%硝酸；3%氢氟酸 蒸馏水	（70±0.5）℃，2 个周期，每周期 2 h	按试样表面积计算，每 1 cm² 不少于 10 mL
硫酸-硫酸铜法	GB 4334.5	硫酸铜（GB 665-65，AR）100 g H_2SO_4（GB 625-77，AR）100 mL 铜屑（纯度不小于 99.5%） 加蒸馏水配成 1 000 mL 溶液	沸腾，16 h	液面高出最上层试样 20 mm 以上

2 介质环境作用下的断裂与疲劳

纯机械应力作用下金属结构的断裂与疲劳仅与裂纹尖端的应力、应变场的水平及金属材料本身抗裂纹扩展的能力有关。而在介质环境作用下的断裂与疲劳则是应力、金属材料、介质三个因素交互作用的结果，金属结构仅受应力作用而产生的破坏为纯机械破坏；金属结构仅受介质环境作用时产生的破坏为腐蚀破坏；金属材料在介质中受静应力作用下产生的破坏为应力腐蚀破裂（Stress Corrosion Cracking，简称 SCC），在交变应力作用下的破坏为腐蚀疲劳（corrosion fatigue）。

有事故调查分析表明，在设备失效事故中，疲劳及应力腐蚀破裂居破坏事故前两位，且 SCC 失效事故的比例在不断上升。如果将应力腐蚀破裂、腐蚀疲劳、氢脆等统称为介质环境作用下的断裂与疲劳破坏，则这种失效形式将是设备失效的主要原因。

本节主要介绍在介质环境作用下焊接结构的 SCC、环境氢脆（HE）、腐蚀疲劳，以及当金属结构作相对运动时产生的磨损腐蚀等。

2.1 应力腐蚀破裂

应力腐蚀破裂是金属在应力（通常为拉应力）与腐蚀介质共同作用下引起的破坏。应力腐蚀破裂是一个自发的过程，只要把金属材料置于特定的腐蚀介质中，同时承受一定的应力，就可能产生应力腐蚀破裂。它往往在远低于材料屈服点的低应力下和即使是很微弱的腐蚀环境中以裂纹的形式出现，是一种低应力下的脆性破坏，危害极大。特定的金属材料、特定的介质环境及足够的应力是产生应力腐蚀的三大条件。

（1）一般知识



通常只有在不发生剧烈均匀腐蚀的介质中，且只有在特定的金属材料－介质环境配合的情况下才会产生SCC。常用金属材料几乎在所有腐蚀介质中都可能产生SCC，只是敏感程度不同而已，常见的易产生应力腐蚀破裂的金属材料－敏感介质体系见表9.3-5。介质环境的温度、浓度及杂质等对SCC有很大的影响，其影响程度因腐蚀体系而异。

表9.3-5　常用材料及其易产生SCC的环境

金属材料	敏感介质
低碳钢	NO_3^-水溶液，NaOH水溶液，HCN水溶液
低合金钢	NO_3^-水溶液，HCN水溶液，H_2S水溶液，Na_3PO_4水溶液，醋酸水溶液，氨水溶液，$(NH_4)_2CO_3$水溶液，NaOH水溶液，碳酸盐水溶液，CO-CO_2-湿空气，海水，海洋大气，工业大气，浓硝酸，硝酸－硫酸混合水溶液
高强度钢	水，湿大气，H_2S水溶液，NO_3^-水溶液
奥氏体不锈钢	含Cl^-、F^-、Br^-的介质，海水，NaOH－H_2S水溶液，NaOH－H_2O_2水溶液，连多硫酸（$H_2S_nO_6$，$n=2\sim5$），浓缩锅炉水，含Cl^-的冷凝水
铜及铜合金	NO_3^-水溶液及大气
铝及铝合金	含Cl^-的介质，海水，NaCl－H_2O_2水溶液
镁合金	HNO_3、NaOH、HF水溶液、含Cl^-的介质，海洋大气，水，SO_2-CO_2-湿空气
钛及钛合金	红烟硝酸，N_2O_4，HCl，含Cl^-的介质，海水，CCl_4，甲醇，有机物

引起SCC的应力为构件生产加工及焊接过程中产生的残余应力与工作应力的迭加。日本有人在20世纪70年代末曾对引起奥氏体不锈钢设备产生SCC的应力种类及事故进行了统计（如表9.3-6所示），从表中可以看出，加工残余应力及焊接残余应力引起的奥氏体不锈钢产生SCC事故分别占大约50%和30%。

多数应力腐蚀破裂体系都存在一个临界应力（σ_{SCC}）或应力强度因子（K_{ISCC}）或临界J积分（J_{ISCC}），当构件所承受的应力或K、J小于相应的这个临界值时，不会产生SCC，即使构件上存在应力腐蚀裂纹，裂纹也不会扩展。

表9.3-6　引起奥氏体不锈钢设备SCC的应力种类及事故统计

应力种类	事故件数	比例/%
加工残余应力	55	48.7
焊接残余应力	35	31.0
操作时的热应力	17	15.0
操作时的作用应力	4	3.5
安装拘束引起的残余应力	2	1.8

应力腐蚀破裂过程包括三个阶段：腐蚀裂纹的萌生、亚临界稳定扩展、失稳扩展。产生SCC的金属在介质中往往能形成保护膜，只有当金属表面的保护膜破裂后方能萌生裂纹，裂纹萌生期通常比较长，有时占整个SCC过程的90%。金属表面的缺陷会引起局部应力应变集中而导致表面膜破裂，金属表面的腐蚀，如孔蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀等往往会成为裂纹源，从而大大缩短了应力腐蚀裂纹的萌生期。萌生的裂纹就像树根一样有许多分叉，其中有一个分叉可能发展成为主裂纹而快速扩展，其余分叉的扩展可能停止或扩展相当缓慢。裂纹一旦形成，即以近乎稳定的速度扩展，即进入了亚临界稳定扩展阶段，直至机械失稳断裂。

应力腐蚀裂纹的扩展速度da/dt与裂纹尖端的应力强度因子K常有如图9.3-14所示的三个阶段的特征。在第Ⅰ阶段，当裂纹尖端的应力强度因子K较小时，随着K的减小，da/dt急剧降低；当K小于K_{ISCC}时，裂纹不会扩展。在第Ⅱ阶段，裂纹以稳定的速度$da/dt|_{Ⅱ}$扩展。当裂纹尖端的应力强度因子达到K_{IC}时，裂纹扩展进入第Ⅲ阶段，即失稳扩展至断裂。

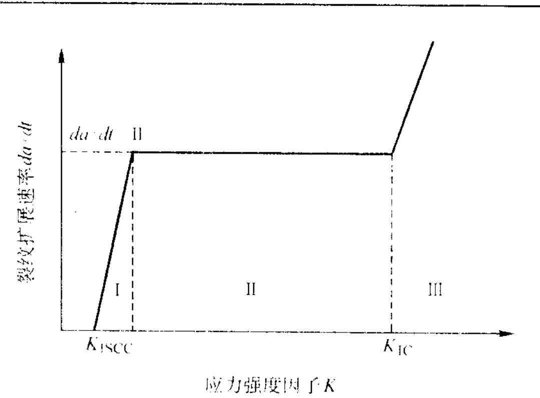


图9.3-14　应力腐蚀裂纹扩展的da/dt－K曲线示意图

K_{ISCC}及$da/dt|_{Ⅱ}$是特别有意义的两个值，从工程角度来讲，可将K_{ISCC}和$da/dt|_{Ⅱ}$作为判断金属材料抵抗应力腐蚀裂纹扩展能力的材料性能指标。根据材料－介质体系的不同，$da/dt|_{Ⅱ}$的差别很大，约为$10\sim10^{-5}$ mm/h。

SCC包括阳极型（APC－SCC）和阴极型（HEC－SCC）两大类。前者可理解为电化学反应及钝化膜破裂等原因，使得作为阳极的裂纹尖端发生快速溶解的过程；后者则是阴极反应产生的氢进入裂纹前沿，而引起的氢脆。本节只讨论阳极型SCC，氢脆型SCC留待下一小节介绍。

应力腐蚀的宏观形貌特征主要有：断口常与主应力方向垂直，裂纹有分枝；裂纹源区及亚临界扩展区常因腐蚀产物的堆积而失去金属光泽；裂纹源产生于局部腐蚀的点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀，或焊接缺陷、疲劳裂纹、热处理裂纹处；最后失稳断裂区具有放射花样或人字纹。在微观上因材料－介质腐蚀体系及应力水平的不同应力腐蚀裂纹可以是沿晶、穿晶或混合型的；断口上常有塑性变形的痕迹，呈冰糖状、贝纹状、羽毛状等花样。

（2）焊接接头的SCC

焊接引起的焊接接头化学成分、显微组织及力学性能的不均匀性，必然导致接头在化学及电化学性质上的不均匀性，从而为SCC创造了条件。即使焊接工艺得当，选材正确，焊接接头的SCC抗力也往往低于母材，参见表9.3-7。

通常，焊接工作者在选择焊接材料时，是以被焊金属材料的焊接性为依据的，合理的焊接材料是保证能够得到完整、无缺陷的焊接接头。因此，往往只注重焊缝与母材强



度、韧性的匹配，而焊缝的成分和组织常与母材有差异，这样就造成了焊缝与母材电化学性质的差异，为 SCC 创造了条件。

表 9.3-7　常用材料和焊接接头的 SCC 临界应力与母材屈服应力的比值（σ_{SCC}/σ_S）

材　料	介　质	温度	母材	接头
低碳钢及低合金钢	碱溶液 硝盐溶液 含 H_2S 介质	>60℃ 沸腾 常温	0.9～1 0.5 0.5～1	0.9～1 0.5 0.3～0.5
12Cr18Ni9Ti 不锈钢 退火状态 形变状态	氯化物	沸腾	0.5～0.6 0.2～0.5	0.4～0.5 0.2～0.4
铝合金	NaCl 3%为基的溶液	常温	0.6	0.5
α 钛合金	溴化甲醇	常温	0.5	0.2～0.4

在焊接接头中 HAZ 中的粗晶、硬化及不均匀组织都会增加 SCC 敏感性。从微观组织上看，晶格在热力学上处于平衡状态的组织 SCC 的抗力最高，而越远离平衡状态的组织越容易产生 SCC。研究表明：焊接接头各区 SCC 抗力差异很大，在单道焊时，包括熔合区在内的粗晶区是 SCC 最敏感的部位；而在多道焊或多层焊时，有时混晶区成了最敏感的部位。

焊接残余应力对 SCC 有很大的影响，在无外加载荷的情况下，焊接残余应力足以使接头上产生 SCC。降低焊接残余应力的峰值和拉应力区的宽度，是降低焊接残余应力引起接头 SCC 的有效手段。例如，在原子能反应堆、核电站及石油化工中广泛使用的 18－8 不锈钢管道多层焊接头在使用中常发生 SCC，研究表明：产生 SCC 的主要原因是焊接 HAZ 上存在数值很高的残余应力，采用水冷法焊接使钢管内壁上产生压应力，可以大大降低 HAZ 的 SCC 敏感性。

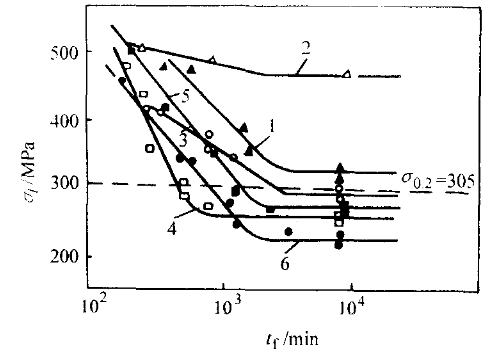
1）低碳钢及低合金钢焊接接头的 SCC　20 g 钢接头各区在沸腾硝酸盐溶液和碱液中的初始应力 σ_i－断裂时间 t_f 曲线如图 9.3-15 所示，相应的 σ_{SCC} 及 J_{ISCC} 列于表 9.3－8，焊接方法对 SCC 的影响见表 9.3-9。从中可得出如下结论：手工电弧焊时，焊缝的 SCC 抗力以 E4303 为最低，E5015 最高且同裂纹面垂直于扎制方向的母材相当；多层焊时 HAZ 各区的 SCC 抗力由低到高依次为：混晶区－熔合区－细晶区，在单道焊时熔合区的抗力最低；接头在硝酸盐中的 SCC 抗力比在碱溶液中差得多。

16MnR 接头的 SCC 抗力远高于 20 g 接头，见表 9.3-10。

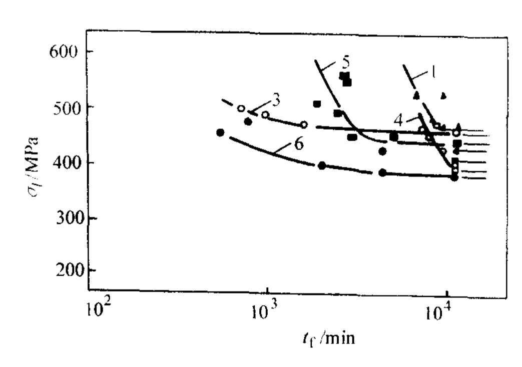
中低强度钢在硝盐和碱溶液中的 SCC 均为沿晶型断口，应力腐蚀裂纹沿铁素体界面扩展，断口呈冰糖状，见图 9.3-16。

高强钢的 SCC 倾向很大，由于其对焊接热循环很敏感，接头各区的组织变化十分复杂，故焊态的 SCC 抗力也有显著差异。表 9.3-11 为 HG80 钢热模拟接头各区在硝盐溶液中的试验结果，由表可见，除焊缝外，其他各区包括母材的性能都极差，而混晶区反倒是可以接受的，可见，在高强度钢结构用于腐蚀性介质中时要十分小心，即使在工业大气中也应采取适当的保护措施。

2）奥氏体不锈钢焊接接头的 SCC　奥氏体不锈钢焊接接头 SCC 性能的变化规律与普通结构钢不同，表 9.3-12 为 0Cr18Ni9Ti 焊接接头各区在沸腾的 42% $MgCl_2$ 溶液中抗 SCC 的临界值。各区 SCC 敏感性由大到小的顺序为：过热区－高温区－高温敏化区－低温敏化区－母材－焊缝。奥氏体不锈钢 SCC 断口视材料、介质及应力水平的不同可能是沿晶型的，也可能是穿晶型的，还可能是混合型的。在沸腾 $MgCl_2$ 42%溶液中 0Cr18Ni9Ti 钢接头的 SCC 断口为穿晶型的，并呈脆性的准解理特征，如图 9.3-17 所示。



(a) 在沸腾硝酸盐溶液中



(b) 在沸腾碱溶液中

图 9.3-15　20 g 钢多层手弧焊接头各区的 $\sigma_i－t_f$ 曲线[5]
1—熔合区；2—细晶区；3—混晶区；4—E4303 焊缝；5—E4315 焊缝；6—20 g 母材（T－S 向）

表 9.3-8　20 g 手弧多层焊接头各区及 Q235－A 钢母材的临界 σ_{SCC} 和 J_{ISCC}

部　位	硝盐溶液		碱溶液	
	σ_{SCC}/MPa	J_{ISCC}/MN·m⁻¹	σ_{SCC}/MPa	J_{ISCC}/MN·m⁻¹
E4303 焊缝	265.3	0.98	407.6	6.50
E4315 焊缝	269.5	1.20	442.3	9.41
E5015 焊缝	—	8.65	—	>9.41①
熔合区	324.8	3.46	—	—
细晶区	491.7	7.24	—	—
混晶区	300.2	2.25	450.9	—
20 g 母材	231.2②	5.06③	375.9②	—
Q235－A 母材	—	4.58③	—	—

①200 h 未断；②T－S 向；③L－T 向

表 9.3-9　不同方法焊接的 20 g 钢接头各区在沸腾硝盐溶液中的临界 σ_{impSCC}、σ_{SCC}、J_{ISCC} 的比较

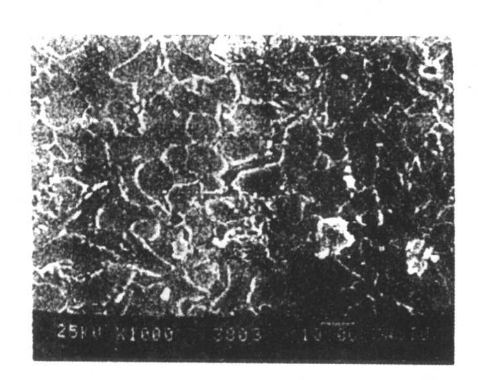
焊接方法	临界值/MPa	熔合区	细晶区	混晶区	母　材
单道插销焊	σ_{impSCC}①	260	419	249	256（//）
多道埋弧焊	σ_{SCC}	274	420	359	288（//）
多道手弧焊	σ_{SCC}	324.8	491.7	300.2	231.2（//）
	J_{ISCC}	3.46	7.24	3.25	5.06（⊥）

注：//为裂纹面平行于扎制方向；⊥为裂纹面垂直于扎制方向
① 插销试验。

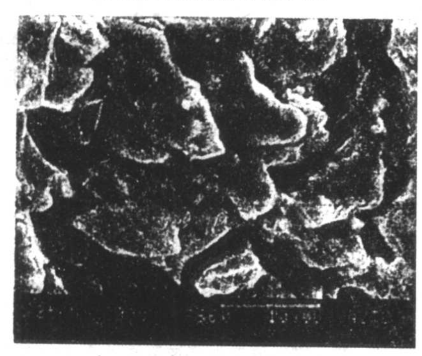


表 9.3-10　16MnR 钢接头 HAZ 各部位在沸腾硝盐溶液中的临界值

临界值	熔合区	细晶区	混晶区	母　材
σ_{impSCC}	347	644	528	300（//），394（⊥）



(a) 裂纹沿铁素体界面扩展



(b) 沿晶的冰糖状断口(SEM)

图 9.3-16　中低强度钢接头 SCC 的微观断口形貌

表 9.3-11　HG80 钢接头在沸腾硝盐溶液中的 SCC 抗力

部位	焊缝	粗晶区	细晶区		混晶区	母材
			焊态	580℃回火		
σ_{SCC}/MPa	750	85	75	200	505	251
σ_{SCC}/σ_S	0.87	0.10	0.09	0.23	0.59	0.29

表 9.3-12　0Cr18Ni9Ti 钢接头各区（热模拟）在沸腾 42%$MgCl_2$ 中的临界 σ_{impSCC}　　MPa

焊缝	过热区 1350～1150℃	高温区 1150～1000℃	高温敏化区 1000～750℃	低温敏化区 750～600℃	母材 <600℃
245.0	28.0	122.5	161.7	166.6	210.7

3）焊接接头 SCC 试验　为了确定焊接接头在实际工况条件下的 SCC 抗力，必须进行接头 SCC 试验。试验用介质可以是实际工况条件下接头使用的环境介质，也可以采用表 9.3-13 所列出的加速试验用介质。

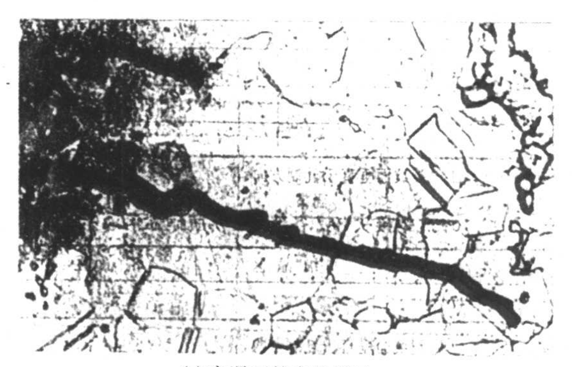
焊接接头 SCC 试验用试样有许多种形式，要根据试验的目的及具体客观条件来选择。在制备试样的过程中要特别注意焊接方法的选择及焊接工艺的确定，因为这些因素对焊接接头 SCC 有很大的影响。根据 ASTM G58－85，表 9.3-14 列出了焊接接头 SCC 试验用试样的型式，可供参考。

4）预防焊接结构 SCC 的途径

① 根据母材在介质中的 SCC 性能，选择与之相匹配的焊接材料。

② 构件或接头的强度计算应该以材料－介质组合下的临界值为依据，在设计结构形状和布置焊缝时应避免造成应力集中，如图 9.3-18 所示。

③ 在选择焊接方法和焊接工艺时，应避免焊接接头上产生粗大、硬化和脆化的组织。例如，奥氏体不锈钢中，粗大的组织对 SCC 最敏感，因此，应该使用能源集中的焊接方法，在工艺上要采取小电流、快速焊。



(a) 高温区的穿晶裂纹



(b) 过热区断口上的扇形花样(SEM)

图 9.3-17　0Cr18Ni9Ti 钢接头在 MgCl2 42%溶液中的微观断口形貌

表 9.3-13　推荐用于焊接接头 SCC 加速试验用的介质

材料	介质成分（水溶液）	试验方法
低碳钢及低合金钢	NH_4NO_3 3%～6%＋$Ca(NO_3)_2$ 50%～57% NH_4NO_3 35%＋$Ca(NO_3)_2$ 45% NaOH 25%～50% NH_4NO_3 50% $MgCl_2$ 42%	沸腾温度下浸入
	NaCl 3% NaCl 3%＋$FeCl_2$ 1% 湿 H_2S	间断浸入，喷淋，浸入
铬镍不锈钢	$MgCl_2$ 42% NH_4NO_3 3%～6%＋$Ca(NO_3)_2$ 50%～57% $CuSO_4$ 110 g/dm^3＋H_2SO_4 55 cm^3/dm^3	沸腾温度下浸入
	HNO_3 10%＋HF 3%	70～80℃浸入



续表 9.3-13

材料	介质成分（水溶液）	试验方法
铬镍不锈钢	NaCl 3% 海水	浸入，间断浸入，喷雾室内
铝合金	NaCl 3% NaCl 3% + H_2O_2 0.1% NaCl 3% + HCl 1% NaCl 3% + CH_3COOH 0.1% + CH_3COONa 0.1% 海水	
镁合金	NaCl 3.5% + K_2CrO_4 2% NaCl 0.001 mol/L	
钛合金	HNO_3 65% ~ 99%	沸腾温度下浸入和置于溶液上面的蒸气中
	晶态 NaCl	290℃ 固态
	NaCl 3% 海水 溴化甲醇（Br 1% ~ 2.5% + H_2O 0 ~ 30% + CH_3OH 余量） HCl 20%	浸入
	HCl 2.5% ~ 5%	沸腾温度下浸入

④ 减小或消除焊接残余应力是防止焊接结构产生 SCC 的有效措施。焊后热处理消除焊接残余应力，采用水冷法焊接或在接头表面上进行喷丸、滚压、锤击等处理使与介质接触的金属表面上产生压应力可以减小甚至避免 SCC。

⑤ 在结构使用中对介质环境进行处理或控制（如加缓蚀剂），必要时还可采用电化学保护方法。

2.2　环境氢脆

环境氢脆是指通过电化学反应产生的氢原子或氢离子以固溶态或生成氢化物的形式扩散到金属中，而引起金属的脆性断裂。它可以被看作 SCC 的一种类型，即阴极型或氢脆型 SCC（HE - SCC）。按金属使用的环境可将环境氢脆分为非 H_2S 介质和 H_2S 介质引起的氢脆两种。

（1）非 H_2S 介质中的氢脆

这类介质主要指海水、盐水等含 Cl^- 的溶液以及蒸馏水、湿空气等。在这类介质中的自腐蚀状态下，通常认为只有 $\sigma_s > 1\ 050$ MPa 的钢才能发生氢脆。如对结构进行阴极保护，使之处于极化状态，则较低强度的钢也可能发生氢脆。

图 9.3-19 为船用钢 912A（$\sigma_s = 690$ MPa）焊接接头在空气和海水中分别进行慢应变拉伸试验（SSRT）的结果，可见在极化条件下这种材料对氢脆是敏感的。

如以 $\phi_{\sigma f}$、ϕ_F 或 ϕ_A 分别表示试样的名义断裂应力、断面收缩率或断裂功的损失率，并以之代表接头在人工海水中的氢脆敏感指数，则在极化条件下它们与试样应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 之间有图 9.3-20a 所示的关系。可见所有接头都有相应的敏感速率，所用钢的强度愈低，敏感速率愈高，反之则愈低。氢脆敏感指数 ϕ 与阴极极化电位 E 的关系见图 9.3-20b，图中还绘出了相应的阴极极化曲线 CPC，以资对照。不难看出，氢脆的起始、快速扩展和断裂这三个阶段大致与 CPC 上活化 - 极化区（I）、浓差极化区（II）和析氢反应区（III）相对应。可见，氢脆起始于 I - II 区交界处，到 III 区已发展到最后阶段，故可将 I - II 区交界处的电位定义为氢脆临界电位（E_{HEC}）作为对结构进行阴极保护的最大保护电位。由此定出的各种钢接头的保护电位分别为：16Mn 钢 - 850 mV_{SEC}，A537 钢 - 870 mV_{SEC}，921 钢 - 880 mV_{SEC}，921A 钢 - 890 mV_{SEC}。

表 9.3-14　焊接接头 SCC 试验用试样一览表

序号	试样名称	图　示	可用于	说　明
1	对接接头		拉伸、弯曲试样	1）尺寸不限 2）注意焊接方向及轧制方向 3）多层焊时要保证层间质量 4）截去焊缝两端 5）按要求截取平行或垂直与焊缝试样
2	环形堆焊接头		测试焊接残余应力作用下母材、焊缝、HAZ 的 SCC 倾向	1）尺寸 100 mm × 100 mm ×（3 ~ 5）mm 2）可将试样夹持或点固焊于基板上以得到拘束 3）推荐环状焊缝直径 50 mm 4）试验后检查正反面裂纹情况
3	棒上堆焊接头		母材 SCC	1）尺寸 ϕ25 mm，长 150 mm 2）用熔焊方法在对称的两面堆焊试样全长 3）两端去掉 6 mm，截取 20 mm 试样 4）检查截面径向裂纹

续表 9.3-14

序号	试样名称	图　示	可用于	说　明
4	直接拉伸试样		母材、HAZ	1）从对接焊接接头上截取试样 2）施加单向拉伸应力 3）可在母材、焊缝、HAZ各区开缺口
5	U形弯曲接头		母材、焊缝、HAZ	1）适用于所有在形成U形弯曲过程中不产生断裂且HAZ无局部弯曲的材料 2）焊缝亦可位于与图示垂直的位置
6	弯曲梁接头		焊缝、焊缝与母材界面、HAZ	尺寸不限
7	预裂纹悬臂梁试样		母材、焊缝、HAZ	1）试样从平板对接接头或K形接头在截取 2）裂纹可预制于接头各区
8	音叉接头	88.9 (3~1/2°) 12.7(1/2°) 12.7(1/2°) 3.38 (2/3°) 63.5 (2~1/2°)	母材、焊缝、HAZ	1）试样由母材机加工而成 2）在一个叉上焊接
9	十字接头		高强钢、装甲板HAZ焊道下裂纹及接头SCC	两端各去掉6.4 mm，按要求的尺寸截取试样
10	C形环和带切口管材接头		母材、焊缝、HAZ	1）本试验为管材SCC试样设计 2）带切口管材接头试样通过楔入楔子施加应力
11	K形坡口试样		多层焊接头各区	可用于制取悬臂弯曲试样



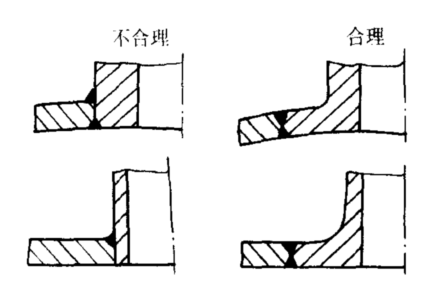


图 9.3-18　防止 SCC 的合理焊缝布置

(2) H_2S 介质中的氢脆

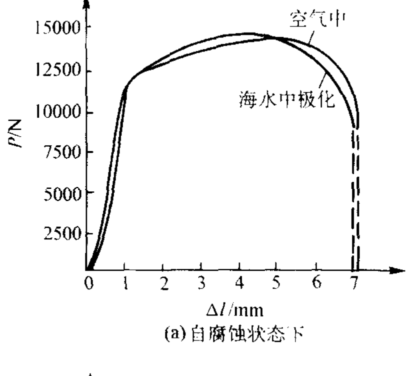
在含有 H_2S 的介质中的氢脆，过去常称为硫化物应力腐蚀破裂（SSCC），现通称为氢致应力腐蚀破裂或氢致破裂（HIC）。实质上 H_2S 介质中的氢脆属于阴极型或氢脆型应力腐蚀破裂。

除环境和力学因素以外，钢的组织对氢脆敏感性也有很大影响，其影响程度由大到小大致可按下列顺序排列：

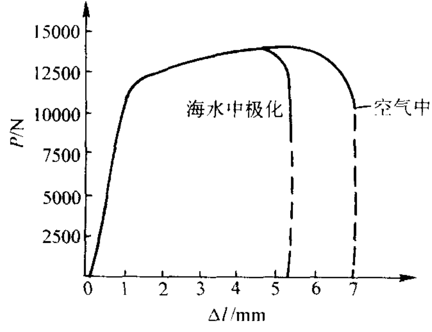
原始马氏体→低温回火马氏体→保留马氏体位向的托氏体→贝氏体→高温回火索氏体→平衡索氏体→珠光体

在结构钢焊接接头中，即使焊缝金属经冶金处理可使氢脆抗力有所提高，但近缝区的回火托氏体带仍可能成为对氢脆最敏感的部位。

为防止 H_2S 介质中的氢脆，美英等国一直沿用 20 世纪 50 年代作出的必须限制钢的硬度小于 HRC22（或 HV212～218）的规定（如 NACE MR－01－75，API RP942 等）。

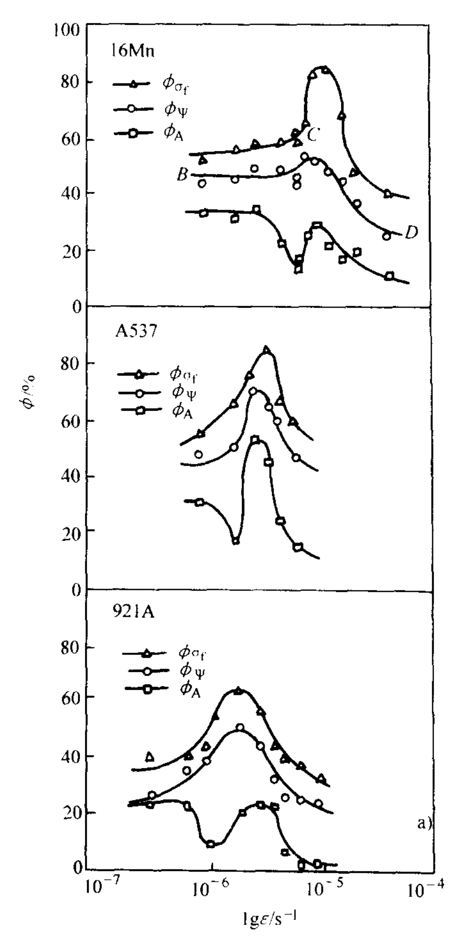


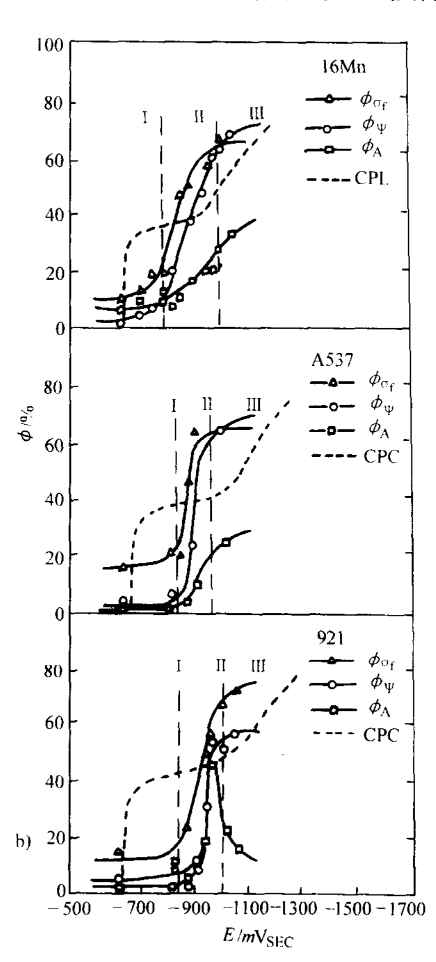
(a) 自腐蚀状态下



(b) 阴极极化状态下（极化电位 -1052mV.SEC）

图 9.3-19　912A 钢接头的 SSRT 拉伸曲线对比





(a) 与应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 的关系（极化电位 $-1052mV_{SEC}$）　(b) 与阴极极化电位 E 的关系

图 9.3-20　焊接接头在人工海水中的氢脆敏感指数 Φ



为避免高强度管线钢焊接接头的 H_2S 应力腐蚀，现在规定焊接区的硬度应限制在248HV以下。

我国对用于油、气田抗 H_2S 介质氢致SCC的低合金钢的热处理也作了如下规定。

① 淬火钢或正火钢，需经621℃以上温度的焊后热处理，以使钢的硬度小于HRC22，$\sigma_s \leqslant 618$ MPa；

② 对于焊接件，需经621℃以上温度的焊后热处理，使硬度不大于HRC22；

③ 对冷加工的钢，以最低温度621℃退火处理，使硬度不大于HRC22。

研究表明：对于C－Mn钢焊缝，如按NACE标准要求，这一规定并无明显松动迹象。问题在于，NACE标准所用溶液（NaCl 5%＋0.5%冰醋酸＋饱和 H_2S 水溶液，pH3～4.5）过于强烈，并且试验是在屈服应力或更高应力下进行的，条件过于苛刻。如改在含（80～100）$\times 10^{-6}$ H_2S 的海水中试验，接头的最高硬度可提高到HV300；而当 H_2S 含量更高但低于饱和浓度时，焊缝不开裂的最高硬度可大于HV272，如在人工海水中作阴极极化试验（－1.5 V，Ag/AgCl），则焊缝很少有出现开裂的危险，而热影响区的硬度甚至可提高到HV400左右。这表明，最高硬度HRC22的规定，对焊接接头似偏于保守。但因目前对此尚无统一见解，应根据具体条件并通过实际试验结果加以处理。

2.3　腐蚀疲劳

金属在腐蚀介质和变动应力共同作用下引起的破坏称为腐蚀疲劳。

（1）一般概念

金属的腐蚀疲劳是化学工业、油气开采及加工工业、热能工业、造船工业及海洋开发业中常见的一种金属结构的失效方式。金属的腐蚀疲劳过程分为：金属表面上裂纹的萌生、裂纹向金属体内部扩展和最终断裂三个阶段，腐蚀疲劳可以看成是介质引起或促进疲劳裂纹萌生和扩展的过程。因此，在研究腐蚀疲劳时仍沿用表征金属机械疲劳（在惰性介质中）的性能指标，如疲劳极限 σ_f、裂纹萌生期、疲劳裂纹扩展速率 da/dN、断裂寿命 N、疲劳门槛应力强度因子幅（简称门槛值）ΔK_{thCF} 等。

用断裂力学的方法研究腐蚀疲劳时，可将其分为三种类型，如图9.3-21所示。

第一种类型即真腐蚀疲劳型，以铝合金－水蒸气腐蚀体系为代表。在低、中应力强度因子区，裂纹扩展率受到水蒸气的作用而大大提高，疲劳裂纹开始扩展的门槛值也因水蒸气的存在而降低（图9.3-21a）。

第二种类型即应力腐蚀疲劳型，以超高强钢－水介质腐蚀体系为代表。疲劳裂纹扩展的门槛值并未受介质的影响，但当 K_{Max} 大于 K_{ISCC} 时，da/dN 突然快速上升（图9.3-21b）。

第三种类型即混合型。在 K_{Max} 小于 K_{ISCC} 时与第一型相似，在 K_{Max} 大于 K_{ISCC} 时与第二型相似（图9.3-21c）。

腐蚀疲劳裂纹往往有些小的分支，在断口形貌上因介质、材料及加载大小及方式的不同有沿晶、穿晶，也有混晶型的。裂纹扩展后期腐蚀疲劳断口接近于机械疲劳断口。

腐蚀疲劳与机械疲劳及SCC在形成条件和断口形貌等方面在很大的差别，列于表9.3-15。

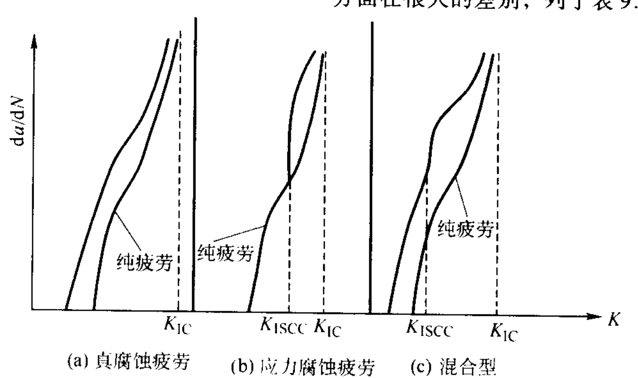


图9.3-21　腐蚀疲劳裂纹扩展的三种类型

表9.3-15　机械疲劳、应力腐蚀、腐蚀疲劳的比较

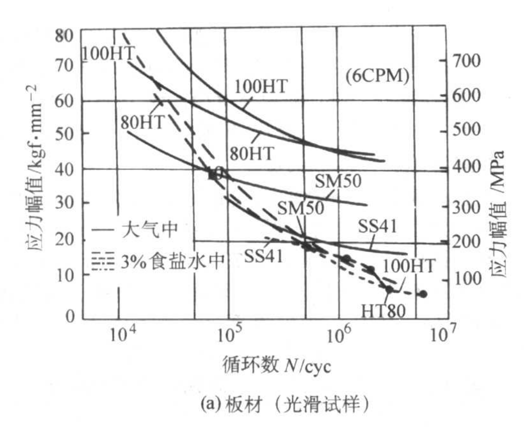
破坏形式	应力腐蚀	机械疲劳	腐蚀疲劳
形成条件	介质＋拉应力	交变拉应力	介质＋交变拉应力
宏观断口特征	有两个区，裂纹扩展区被腐蚀产物覆盖	大部分呈光滑面，有贝壳状疲劳条纹，小部分呈结晶状粗糙面	裂纹扩展区被腐蚀产物覆盖，有贝壳状疲劳条纹，小部分呈结晶状粗糙面
微观断口形貌	断口上有韧窝、准解理、解理、腐蚀坑、河流花样，有沿晶、穿晶及混合型断口，裂纹分支多	大多数为穿晶型，裂纹分支少	大多数为穿晶型，裂纹分支少。在低 R，高 f 下，断口上有明显的疲劳断口形貌；在低 f，高 R 下，早期断口接近SCC断口的形貌，后期断口有疲劳断口形貌

力学、环境和冶金三个方面的因素均影响到金属的腐蚀疲劳行为。影响腐蚀疲劳的力学方面的因素主要有载荷频率（f）、应力比（R）和载荷波形；在环境方面，介质的成分、浓度、pH值、温度等对腐蚀疲劳均有影响；在冶金方面，化学成分、组织及冶金质量等对腐蚀疲劳有很大的影响。

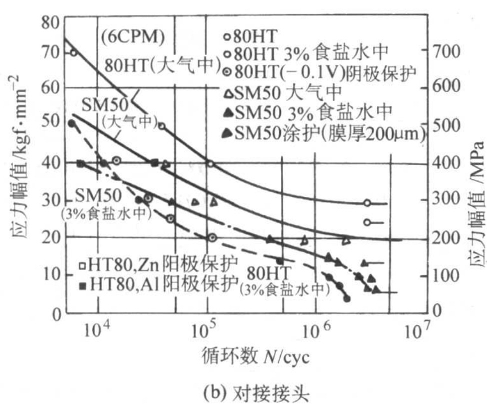
（2）焊接接头的腐蚀疲劳

焊接接头在介质中的疲劳强度比母材低。图9.3-22列出了几种高强钢及其焊接接头在模拟海浪低频（6 cyc/min）加载方式的人工海水中的腐蚀疲劳曲线。从图中可以看出，以 $N = 2\times10^6 \sim 3\times10^6$ 的寿命相比较，无论是母材还是接头的疲劳强度都远低于机械疲劳强度；比较图9.3-22a与图9.3-22b知，接头的疲劳强度比母材的要低得多。





(a) 板材（光滑试样）



(b) 对接接头

图 9.3-22 几种钢及其接头在人工海水中的腐蚀疲劳曲线

海上平台用钢 A537 及其接头在海水自腐蚀条件下不产生 SCC，但会产生低周腐蚀疲劳。在低周交变应力下，随着力学参数、介质状况及电化学条件的变化，阳极反应和阴极反应在裂纹扩展过程中相互促进和竞争，形成 SCC 和腐蚀疲劳共存的综合过程。图 9.3-23 为热模拟接头粗晶区和细晶区在 3.5%NaCl 溶液中的低周疲劳 $da/dN-\Delta K$ 曲线，以及供对应参照的粗晶区的机械疲劳 $da/dN-\Delta K$ 曲线，在较低应力强度因子幅 ΔK 时，出现了应力腐蚀疲劳平台，其断口形貌见图 9.3-24。细晶区的抗腐蚀疲劳性能优于粗晶区。

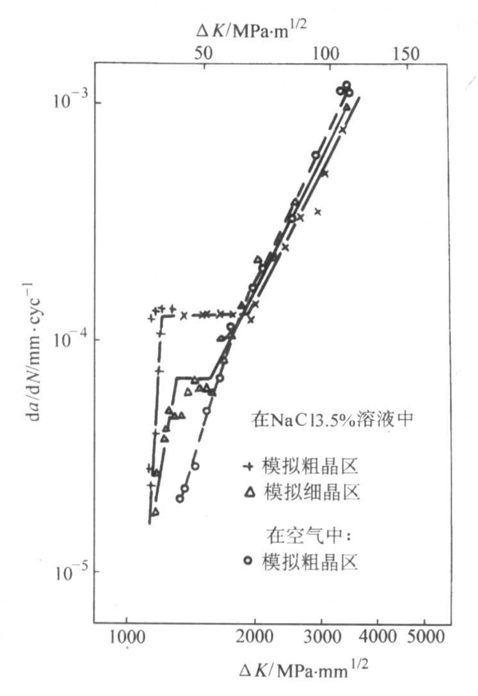


图 9.3-23 A537 钢接头粗晶区和细晶区在室温 3.5%NaCl 溶液中的 $da/dN-\Delta K$ 曲线表
（0.2 Hz，正弦波形，$R=0$，pH = 8）

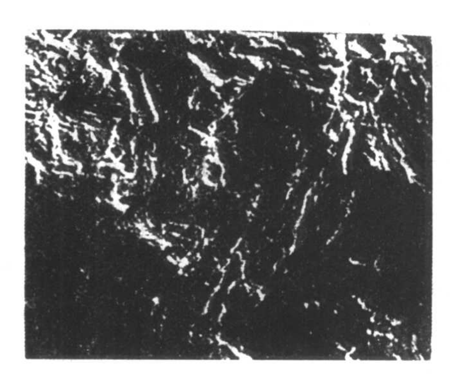
(3) 提高焊接接头腐蚀疲劳性能的途经如下。

① 根据介质条件选择适当的结构材料和相匹配的焊接材料。

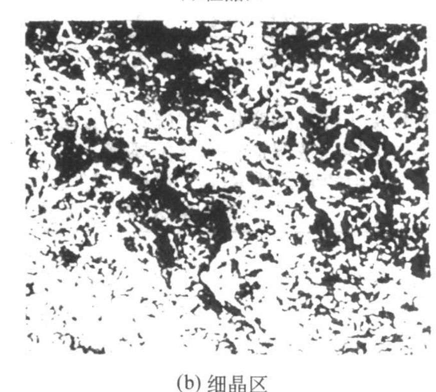
② 降低设计应力，使之低于预定寿命下的临界值，在结构形状设计上要注意避免应力集中。

③ 制造工艺上应注意防止各种缺陷，降低或消除焊接残余应力，必要时对焊缝进行 TIG 表面重熔或其他表面处理。

④ 采用电化学保护，有时可对介质进行缓蚀处理。



(a) 粗晶区



(b) 细晶区

图 9.3-24 A537 钢接头粗晶区和细晶区在室温 3.5% NaCl 溶液中的应力腐蚀疲劳断口形貌（平台阶段）

3 焊接接头抗腐蚀性的评定及提高抗腐蚀性的措施

鉴于焊接接头的特殊性，焊接接头的腐蚀试验方法及评定指标不同于一般材料的腐蚀试验。

3.1 焊接接头的腐蚀试验

用于焊接接头的腐蚀试验可分类如下。

(1) 按试验目的分

研究接头腐蚀机制的基础性试验；为选材和制订工艺进行的生产性试验；分析结构事故起因的专门试验。

(2) 按试验对象分

用试样的试验；用结构和工艺上相似的构件或结构模型进行的模拟试验；结构的实体试验。

(3) 按介质分

加速试验；生产试验。



(4) 按应力状态分

内应力试验；外应力试验（恒载荷、恒变形、恒应变速率，单向应力、双向应力，拉伸弯曲、扭转等）；内应力与外应力综合试验；有、无应力集中试验。

(5) 按采用不同评定指标的腐蚀类型分

表 9.3-16 列出了不同腐蚀类型和评定指标的试验项目供参考。

表 9.3-16　焊接接头主要腐蚀类型的评定指标

腐蚀类型		试验目的	评定指标（符号及单位）
总体腐蚀		腐蚀失重率	q：g/（m^2·h）
		腐蚀深度	h：mm/年
		力学性能：拉伸	σ：MPa；δ：%
		弯曲	P：N；α°
		电位变化	E：mV
局部腐蚀	晶间腐蚀及选择性腐蚀	力学性能：拉伸	σ：MPa；δ：%
		弯曲	P：N；α°
		腐蚀深度	h：mm/年
	孔蚀及溃疡腐蚀	腐蚀深度	h：mm/年
		出现腐蚀时间	t：d（天）
		蚀孔及蚀点个数	n
应力作用下的腐蚀	应力腐蚀	破裂时间	t_f：h
		速率	da/dt：mm/min；mm/h
		临界应力	σ_{SCC}：MPa
		断裂韧度	K_{ISCC}：$N/mm^{3/2}$
			J_{ISCC}：N/mm
	腐蚀疲劳	名义疲劳极限	σ_N：MPa
		断裂循环次数	N

对于以选材及评定接头的抗蚀性为目的的腐蚀试验，除测定单纯介质作用下性能的变化外，还需进行应力状态下的腐蚀试验考察接头性能的变化。考虑到目前尚缺乏足够的针对焊接接头抗蚀性的数据资料和有关规范，建议将腐蚀试验的结果与在空气中的原始数据进行对比，以便作出基本评价。

为此，如以 X_0 和 X 分别代表原始状态和经腐蚀试验后母材、焊缝或接头等的某一性能数据，即可求得相应的性能变化的相对系数或敏感指数 $\Phi = X/X_0$ 或 $\Phi = (X_0 - X)/X_0$%。并可用 M、J、W 等作 Φ 的下标，分别表示母材、接头、焊缝等的耐蚀性能参数。

对于总体腐蚀，一般采用失重率法或腐蚀深度法。为此，试样应分别取自母材、焊缝 + 热影响区、母材 + 热影响区等区段，试样尺寸取 25 mm × 70 mm 或 50 mm × 70 mm，面积为热影响区的 5 ~ 10 倍。腐蚀深度可由失重率换算而得，即 $h = 0.87q/\rho$，其中 q 为失重率（$g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$），$\rho$ 为金属密度（$g \cdot cm^{-3}$）。抗总腐蚀性可按 10 级分等，见表 9.3-17。

表 9.3-17　金属材料抗总腐蚀性的等级评定

腐蚀分类	年腐蚀速度 /$mm \cdot a^{-1}$	耐蚀性分级	失重率/g·（m^2·h）$^{-1}$ 钢铁材料	失重率/g·（m^2·h）$^{-1}$ 铝及铝合金
Ⅰ完全耐蚀	< 0.001	1	< 0.000 9	< 0.000 3
Ⅱ很耐蚀	0.001 ~ 0.005	2	0.000 9 ~ 0.004 5	0.000 3 ~ 0.001 5
	0.005 ~ 0.01	3	0.004 5 ~ 0.009	0.001 5 ~ 0.003
Ⅲ耐蚀	0.01 ~ 0.05	4	0.009 ~ 0.004 5	0.003 ~ 0.015
	0.05 ~ 0.1	5	0.004 5 ~ 0.09	0.015 ~ 0.031
Ⅳ较不耐蚀	0.1 ~ 0.5	6	0.09 ~ 0.045	0.031 ~ 0.154
	0.5 ~ 1.0	7	0.45 ~ 0.9	0.154 ~ 0.31
Ⅴ很不耐蚀	1.0 ~ 5.0	8	0.9 ~ 4.5	0.31 ~ 1.54
	5.0 ~ 10.0	9	4.5 ~ 9.1	1.54 ~ 3.1
Ⅵ完全不耐蚀	> 10	10	> 9.1	> 3.1

对于有局部腐蚀或集中腐蚀的接头，则不能采用失重法，而应用深度法，并配合力学性能的测定。应力状态下的试验可参照表 9.3-14 进行。

3.2　常见焊接接头的抗蚀性

常见金属材料及其焊接接头抗腐蚀性能列于表 9.3-18，供参考。

表 9.3-18　常见金属材料及其接头在各种介质中的腐蚀类型和耐蚀性

材　料	介　质	总体腐蚀 母材耐蚀级别	总体腐蚀 $\frac{q_M}{q_J}\left(\frac{h_M}{h_J}\right)$	局部腐蚀 母材耐蚀性	局部腐蚀 $\frac{h_M}{h_J}\left(\frac{\sigma_M}{\sigma_J}\right)$	应力腐蚀 母材耐蚀性	应力腐蚀 $\frac{\tau_M}{\tau_J}$	应力腐蚀 $\frac{\sigma_{SCCM}}{\sigma_{SCCJ}}$	接头主要破坏形式
低碳钢 Q235A	天然大气	3 ~ 5	0.6 ~ 0.9	耐蚀	1	耐蚀	—	—	GC
	工业大气	5 ~ 6	0.6 ~ 0.9						
	淡水		0.6 ~ 0.8						
	海水	6 ~ 8	0.4 ~ 0.7						
	含 H_2S 天然介质	4 ~ 8	0.6 ~ 0.8			可能 SCC	0.1 ~ 1.0	0.7 ~ 1.0	SCC，GC
	热碱溶液	3 ~ 4	0.8 ~ 1.0			SCC			SCC
不锈钢 12Cr18Ni10Ti	天然大气	2 ~ 3	0.3 ~ 0.5	可能 PC		耐蚀	—	—	耐蚀
	海水	4 ~ 5	1	PC					PC
	65%硝酸（沸腾）	5	0.2 ~ 1.0	IC	0.2 ~ 0.9				IC，LG
	98%硝酸（20℃）	2 ~ 3	1	耐蚀	1				
	20%盐酸（5℃）	6 ~ 7	0.5	IC	0.3	—	0.05 ~ 0.5	0.8	GC，LC，SCC
	$MgCl_2$42%（沸腾）	—	—	—	—	SCC			
铝及铝合金 LF6	天然大气	4 ~ 5	0.3 ~ 0.5	可能 OC	1	耐蚀	1	1	PC
	工业大气								
	98%硝酸（20℃）	4 ~ 5	1	耐蚀					LC
	海水，NaCl3%溶液	4 ~ 6	0.5 ~ 1.0	可能 IC		可能 SCC	0.2 ~ .8	0.8	PC，LC，SCC
钛及钛合金	天然大气及淡水	1	1	耐蚀	1	耐蚀	1	1	完全耐蚀
	海水								可能 CF
	65%硝酸（沸腾）	4 ~ 6		可能 IC		可能 SCC			
	20%盐酸（5℃）	6	0.7		—		0.1 ~ 1.0	0.2 ~ 0.4	IC,SCC,GC,CF

注：GC：总体腐蚀；LC：局部腐蚀；PC：孔蚀；IC：晶间腐蚀；SCC：应力腐蚀；CF：腐蚀疲劳。



3.3　提高焊接接头抗蚀性的途径

焊接接头抗蚀性的改善是一个综合性的课题。从选材、设计、制造、防护到结构的运行维护，对每一环节都必须予以足够重视，才能达到预期效果。提高焊接接头抗蚀性有以下几个环节

1）结构材料及焊接材料的合理选择　结构材料的抗蚀性在一般的腐蚀手册中均可查到，但焊接接头的抗蚀性则需通过试验加以确定。用于腐蚀条件下的焊接材料现尚无系统的资料可供参考，要特别注意焊接材料与结构材料（母材）的物理化学性能、力学性能特别是抗腐蚀性能的合理匹配，以满足给定腐蚀体系的要求。

2）焊接结构的合理设计　首先对结构在给定工况下可能产生的腐蚀类型有一概括的了解，在此基础上开始有针对性的设计。抗腐蚀结构设计必须遵循的共同准则包括正确的强度计算，避免应力集中和在高应力区布置焊缝；尽量降低对腐蚀特别敏感部位的刚度和避免可能引起过大残余应力的结合点或区域；避免妨碍液体流动和排放的结构死区（见图 9.3-25）等。

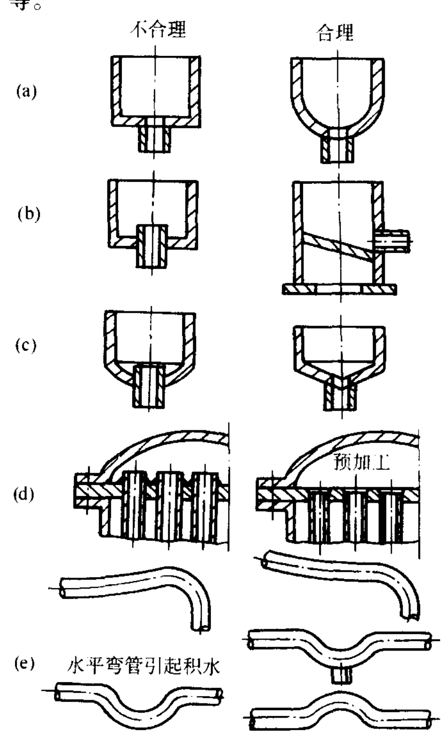


图 9.3-25　防止妨碍液体流动及排放的容器和管道设计

3）合理的焊接工艺　要明确抗腐蚀结构不同于一般结构，在制造工艺上有更加严格的要求。焊接工艺上除要正确选择焊接材料外，还包括焊接方法及线能量的选择、焊接顺序的确定、焊缝熔合比的控制、焊接缺陷的防止、残余应力及应力集中的防止和消除等。

4）结构的表面防护　详见下一小节。

5）介质的缓蚀处理　清除或减少介质中能促进腐蚀的有害成分，有时可加入缓蚀剂。

6）结构的电化学保护 – 阴极保护　将结构接在直流电源的负极，使之处于阴极极化状态而受到保护，称为外加电流阴极保护法。而在结构上接一电位较负的金属（例如在船体上接锌合金）作为阳极，以达到阴极极化目的，则称为牺牲阳极保护法。大型结构进行外加电流保护时，应根据不同部位的实际电位分别确定所需的电流密度，并应注意控制保护电位使之处于安全范围内，以免过大的负电位引起氢脆。

3.4　焊接结构的表面防护

在金属表面设置防护层以隔离腐蚀介质是重要的防腐措施。防护层分为金属镀层和非金属涂层两大类，见表 9.3-19。防护层的选择取决于结构的腐蚀类型及使用条件、施工条件、维修要求、安全卫生等因素。

表 9.3-19　防蚀保护层的分类

金属镀层		非金属镀层		
有阴极保护	无阴极保护	无机材料	有机材料	
			天然材料	合成材料
锌 铝 镉	锡 铅 镍 铜 贵金属 合金钢	搪瓷 水泥 陶瓷	油 橡胶 沥青 油漆	塑料 聚苯硫醚

防护层的厚度随涂镀方法、所用材料和结构的工作环境不同而异。为保证防护层完整可靠和便于镀涂工艺的顺利进行，在设计这类构件时在结构形状上有一定要求。现举例介绍如下。

1）镀锌　大尺寸构件因受镀槽尺寸的限制，常不能保证浸镀质量，应将其分段镀锌，然后用铆接、螺栓连接或焊接方法加以连接。大平面和用筋板加强的板壁均不利于浸镀，改成弯边加强或制成浅拱形较为有利。图 9.3-26 为镀锌件接头设计的改进实例。

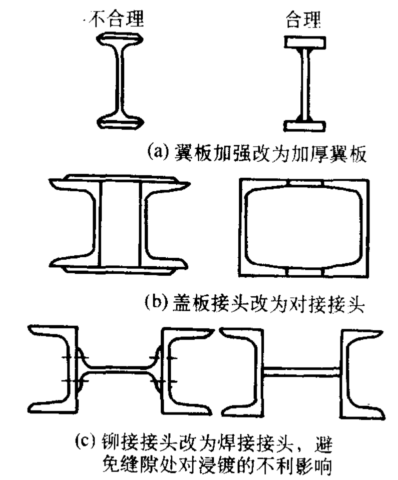
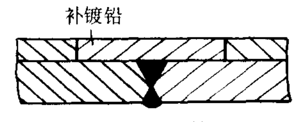


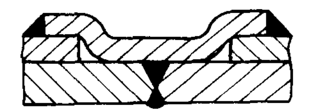
图 9.3-26　镀锌件的接头设计

2）镀铅　镀层厚度可达 3 ~ 8 mm。但必须在水平位置或勉强在垂直位置浸镀。镀铅板的焊接可用图 9.3-27 所示的两种方法进行。先将焊接处 40 mm 以上宽度内的铅层除净，焊后修磨，然后用手工补镀所缺铅层。也可在焊后覆盖上铅带，用铅料填充封焊。

3）衬铅　管类零件的铅衬（厚 3 ~ 10 mm）可用挤压法获得。图 9.3-28 所示的插管与镀铅容器壁焊接后就可以用这种方法补上铅衬。此外，铅管的焊接由于只能在平焊、立焊及横焊位置而不能在仰焊位置进行，故在接头设计上应采取相应措施。对于固定的立管，可采用图 9.3-29 所示的花萼形接头。对于水平位置的铅管，如果是可以转动的，保持平焊位置是不成问题的。但如不能转动，则可采用图 9.3-30 所示的“窗口”形接头，即在铅管的上半部开一个窗口，由此用内焊缝焊接管子的下半部，然后盖上窗板，再用外焊缝完成管子上半部的焊接。



(a) 焊后用手工补焊镀



(b) 焊后用铅带封焊

图 9.3-27 镀铅板的焊接

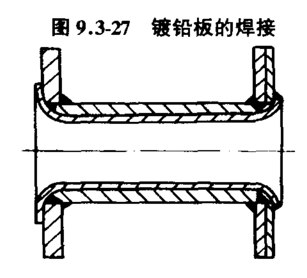


图 9.3-28 衬铅插管与镀铅容器壁的焊接

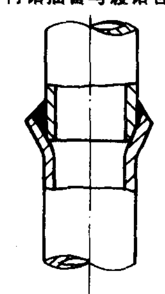


图 9.3-29 垂直位置铅管的焊接

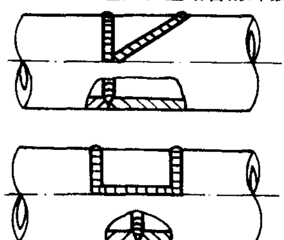


图 9.3-30 铅管避免仰焊的"窗口"接头

4）热喷涂 可喷涂锌、铝及多种合成材料，涂层厚度可大于 2 mm。此法的优点在于能喷涂大型工件，并可灵活运用于修理工作。但因涂层的孔隙性较大，在重要场合需进行机械碾实或熔结、烧结等后处理，以提高其密实性。设计这类结构应注意的问题可用图 9.3-31 来说明。要点在于保证能喷涂到（可达性）和避免尖角。

在我国南海地区，由于高温、高湿、高盐雾的恶劣环境，舰船钢铁结构腐蚀十分严重，有的船只中修换板率达50%以上。在现有防腐措施无法解决舰船防腐问题的情况下，全军装备维修表面工程研究中心开发研制出了优质、高效、低成本、适合于现场施工的电弧喷涂防腐技术并成功地解决了舰船钢结构防腐的重大难题。

5）搪瓷 镀层有耐酸（但不耐氢氟酸和浓磷酸）、耐碱、耐日晒、耐老化等优点，但不耐冲击和急剧的温度变化，破损处极难修复。设计这类结构的要点是避免尖角和各部分之间过大的刚性差异。为此，应保持内角圆弧半径≥5 mm，外半径≥8 mm；力求结构光滑流畅，截面和形状对称，避免有局部阻碍伸缩的地方。见图 9.3-32 所示，其中关于螺母的处理改焊死（图 9.3-32i）为用弓形板固定（图 9.3-

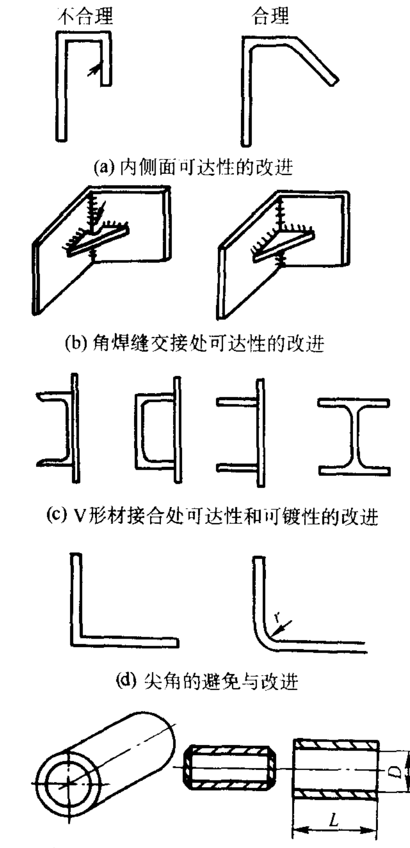


图 9.3-31 热喷涂件的设计

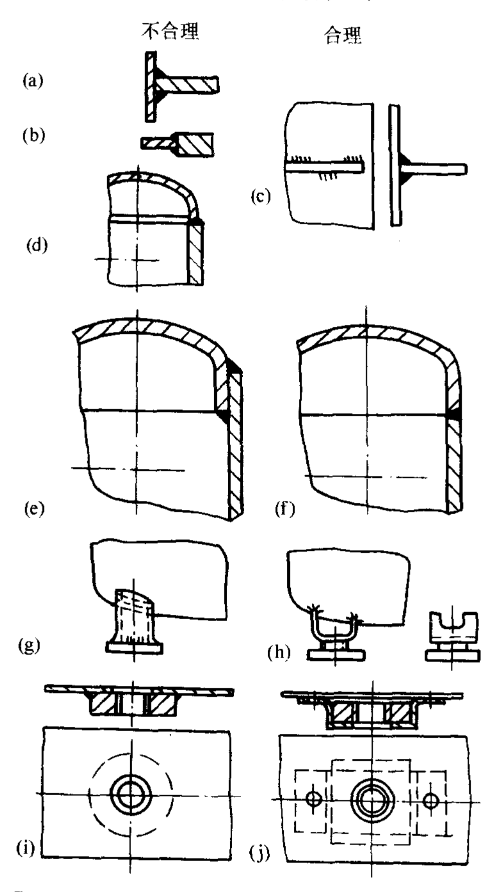


图 9.3-32 搪瓷件的设计－避免各组件间的刚性差异



32j)。此外，还应避免点焊的搭接接头而改用对接，并注意双面焊夹缝中空气的排出，可改用单面焊（搪瓷侧），或钻排气孔，如图9.3-33所示。

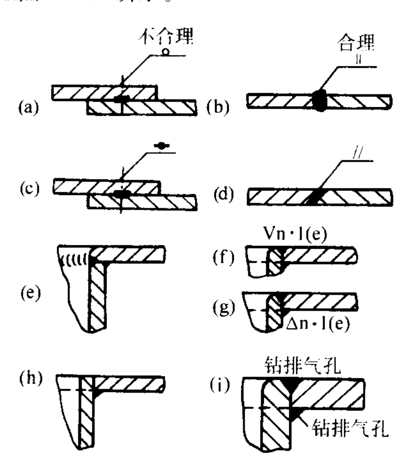


图9.3-33 搪瓷件的设计－避免搭接缝隙，设置排气口

4 焊接接头的耐热性

4.1 高温下焊接接头的组织变化

碳钢和低合金耐热钢焊接构件在高温下长期工作时，由于组织不稳定，会导致性能改变。碳钢和碳锰钢在高温下长期运行后，最容易发生珠光体球化和石墨化，在焊接热影响区还会产生魏氏组织。而对于耐热钢来说，主要是碳化物析出。

1）珠光体球化 所谓珠光体球化就是片状珠光体中的渗碳体（Fe_3C）有自行转化为球状并聚集成大球团的趋势。而铁素体中析出的碳化物也同时聚集长大，在晶界处尤为明显。

钢中碳化物形态及分布情况对热强性有较大的影响，一般说来，片状碳化物的热强性较高，球状碳化物，特别是聚集成大块的碳化物，会使钢的热强性明显下降。

碳钢最易球化，而钼钢、铬钼钢则较碳钢稳定，但铬钼钢如运行不当（如超温等），也会发生珠光体球化。12Cr1MoV钢180℃时的管子爆破试验表明，中度球化对持久强度影响不大，但完全球化将使持久强度降低1/3。

球化组织可通过正火处理恢复成原先的片状组织。

2）石墨化 石墨化是比球化更为严重和有害的组织变化现象。产生石墨化的原因主要是渗碳体在高温下的自行分解：$Fe_3C \rightarrow 3Fe + C$（石墨）。石墨通常沿晶析出，呈链状分布，由于石墨的强度非常低，在钢中可视为空洞或裂纹。譬如，某电厂管道在505℃下工作5年半后，在距焊缝金属约3～4 mm处沿整个横截面突然断裂，原因即在于石墨化。

为避免石墨化的产生，往往在钢中加入与碳有较强结合力的元素，如铬、钒等。一般说来，0.5%钼钢有较大的石墨化倾向，所以这种钢已由Cr－Mo钢来代替。

3）魏氏组织 魏氏组织在焊接热影响区产生的原因是由于过热。魏氏组织对室温强度影响较小，却能提高高温强度，但塑性则有所降低。魏氏组织的最大不利之处在于冲击韧性太低，往往会引起接头的脆性破裂。

4）碳化物析出 低合金耐热钢焊接构件经高温长期运行后的主要问题是析出碳化物，导致冲击韧性下降，如E5515－B3－VNb焊缝金属，经620℃长期时效后，α_{KV}值的变化如表9.3-20所示。

12Cr1MoV钢及其焊接接头中碳化物的类型以Fe_3C和VC为主，其他的碳化物类型还有Mo_2C、Cr_7C_3和M_6C等。

表9.3-20 E5515－B3－VNb焊缝金属α_{KV}值的变化

时效时间/h	原始状态	500	1 000	4 000
α_{KV}/J·cm^{-2}	154	115	71	53

5）高合金钢的组织稳定性 12%Cr耐热钢焊接构件的组织比较稳定，在高温下长期时效后，在原先回火马氏体内仍保留了高密度位错和弥散的碳化物强化相。这样不但钢的热强性能比较稳定，而且持久塑性亦不随蠕变断裂时间的增加而下降，一般来说，仍可保持$\delta_5 \geq 20\%$。

对于18－8型耐热不锈钢焊接接头来说，焊缝组织一般为树枝状奥氏体、δ铁素体和碳化物，在650℃下长期时效时，随着时间的延长，组织变化不大，碳化物则略有增加，以后碳化物不断长大，常温强度提高，冲击韧性下降，最后趋于稳定。

此外，在长期时效过程中，开始时，焊缝金属硬度升高，以后则明显下降。

18－8不锈钢焊接接头热影响区在650℃时效过程中，冲击韧性亦有所下降，在1 000 h内，下降明显，以后则趋于平缓。

4.2 焊接接头的高温性能

在焊接结构中，焊缝和热影响区是相对比较薄弱的环节。因此，在进行焊接构件的设计或寿命分析时，必须注意到焊接接头的特殊性。本小节介绍焊接接头的高温短时拉伸性能，有关焊接接头的蠕变将在下一小节介绍，有关钢材在不同温度下的许用应力值见GB 9222—1988和GB 150—1989，或参阅美国ASME锅炉和压力容器规范第1卷动力锅炉建造规程。

高温短时拉伸性能包括高温抗拉强度、高温屈服点、高温下的伸长率和断面收缩率，是高温受力焊接件强度设计的基本依据。对焊接接头来说，试验时一般仅测定高温抗拉强度值并记录断裂位置。

高温抗拉强度和高温屈服点随温度的变化而变化，高温抗拉强度与温度之间的关系可以用$\sigma_b－T$曲线来表示。在大多数碳钢、低合金铬钼（钒）钢和耐热不锈钢的$\sigma_b－T$曲线上，初始阶段，随着温度的上升，σ_b明显下降，以后则比较平缓，随着温度的进一步升高，σ_b急剧下降。在碳钢和某些低合金钢如铬钼钢的$\sigma_b－T$曲线上，在中间阶段，还会出现一个峰值，这是时效硬化的结果。对20钢及其焊接接头来说，其峰值在250℃左右，对15CrMo钢而言，则在350～400℃之间，相对伸长率在此温度下亦有一个最低值，此温度区间亦称为蓝脆区。图9.3-34为20钢、15CrMo钢及18－8不锈钢的$\sigma_b－T$曲线，其焊接接头亦有相类似的曲线。

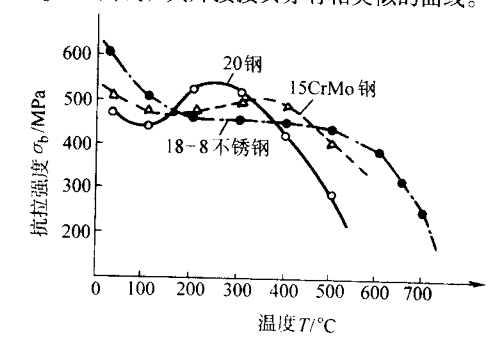


图9.3-34 20钢、15CrMo钢及18－8不锈钢的$\sigma_b－T$曲线

一般说来晶粒度大小对高温抗拉强度有较大的影响，晶



粒度小的钢，σ_b 较高。同样，随着温度的上升，硬度值也下降，在高温硬度与高温抗拉强度 σ_b 之间大体上有如同室温一样的线性关系。各种钢材及其焊接接头的高温屈服点则随温度的升高而降低。

除化学元素外，焊接接头的高温性能还取决于焊缝的组织状态及其树枝状晶的晶粒度大小。焊后正火+回火处理能显著提高低合金耐热钢焊接接头的高温强度。

铬钼钒珠光体耐热钢用 E5515 - B2 - V 焊条熔敷金属经 730℃×3 h 回火处理后的典型高温性能列如表 9.3-21 所示。

表 9.3-21　E5515 - B2 - V 焊条熔敷金属的高温拉伸性能

温度/℃	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ_5/%	ψ/%
室温	≥440	≥540	≥17	—
540	376	416	22.8	76.6
580	336	365	25.2	81.1

316 型奥氏体焊缝金属的典型拉伸性能如表 9.3-22 所示。

表 9.3-22　316 型奥氏体焊缝金属的高温拉伸性能

温度/℃	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	δ_5/%
20	500	635	35
538	300	395	26

4.3　焊接接头的高温蠕变

金属在高温和应力作用下发生缓慢和持续塑性变形的现象称为蠕变。形变量与时间的关系曲线称为蠕变曲线，见图 9.3-35 。蠕变的第一阶段是蠕变的不稳定阶段，在此阶段中，金属以逐渐减慢的应变速度积累塑性变形；蠕变的第二阶段是蠕变的稳定阶段，这时金属以恒定的应变速度产生变形，这一速度又称蠕变速度；蠕变的第三阶段是蠕变的最后阶段，此时，蠕变是加速进行的，直至发生断裂。

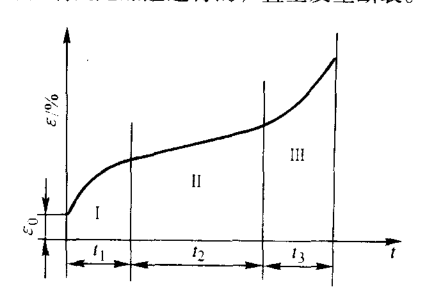


图 9.3-35　蠕变曲线

ε—变形量；t—时间

碳钢及其焊接接头在 350℃以上、在工作应力下，就会出现比较明显的蠕变现象，而低合金耐热钢及其焊接接头则在 450℃以上才会发生蠕变。一般说来，使金属产生明显蠕变现象以上的温度称为高温，在此以下的温度区间（100～300℃）称为中温。在较高温度下，具有抗蠕变能力的钢材称为热强钢；具有抗氧化能力的钢材称为热稳定钢；同时具有这两种能力的钢又称为耐热钢。在高温下工作的焊接结构用钢一般均为热强钢或耐热钢。

（1）蠕变极限

蠕变极限有两种定义。一种是在工作温度下，引起规定的应变速度（即蠕变速度）的应力值。在电站设备中，规定的应变速度大多为 $v=1\times10^{-5}$ %/h 或 $v=1\times10^{-4}$ %/h。以 $\sigma_1\times10^{-5}$ 代表蠕变速度为 1×10^{-5} %/h 的蠕变极限；$\sigma_1\times10^{-4}$ 代表蠕变速度为 1×10^{-4} %/h 的蠕变极限。另一种蠕变极限的定义是：在一定工作温度下，在规定的使用时间内，使试件发生一定量的总变形的应力值。例如，σ_1/100 000 代表 10^5 h 总变形为 1% 的蠕变极限。

（2）持久强度

由蠕变而导致的断裂称为蠕变断裂或持久断裂。持久强度是钢材在规定的蠕变断裂条件下，即在一定的温度和规定时间内，保持不失效的最大承载能力。持久强度是钢材所具有的一种固有特性，是在一定温度和一定应力下钢材抵抗断裂的能力。持久强度以 σ_D^t 表示，单位为 MPa，例如 $\sigma^{580℃}_{10^5}$ 表示在 580℃下试样经 10^5 h 断裂的应力。在高温下工作的焊接构件的设计寿命过去为 10^5 h，现在已延长到 2×10^5 h，甚至更长，所以需要根据相应时间的持久强度进行设计。

对在高温下受力的焊接构件来说，由于蠕变绝大部分为钢材本身所承受，焊接接头局部的蠕变只是整个蠕变变形的一个非常小的部分，所以在一般情况下，蠕变极限很少用来作为焊接接头强度设计的依据，而蠕变断裂强度或持久强度则是焊接接头强度设计的主要依据。

持久强度试验是一种在恒温、恒载荷下测定试样蠕变断裂时间的试验方法，高温持久强度曲线则是蠕变断裂应力与蠕变断裂时间之间的关系曲线，其主要表现形式为在一定温度下的蠕变断裂寿命 $t_r=f(\sigma)$。根据该曲线可外推出该温度下的持久强度，即到达某一规定时间的应力。

持久强度的主要外推方法如下。

1）等温线法　即 $F(t,\sigma)=0$，T=常数，一般以经验公式 $t=A\sigma^{-B}$ 表示，式中 A、B 为与材料和温度有关的常数。该式表示，在双对数坐标图上，断裂时间对数 $\lg t$ 和应力对数 $\lg\sigma$ 之间呈线性关系。这种关系与试验数据也是大致相符的。由此，可用在较高应力下得出的短时试验数据来外推出长时持久强度值。这种方法的优点是简单、直观，但当试验时间不够长时，精度不高。

2）时间温度参数法　即 $F(T,t)=P(t)$，常用的公式有 $T(c+\lg t)=P(\sigma)$，式中 P 为拉森－米勒参数，在图上通常以 $\lg\sigma-P$ 表示。参数法的优点是温度与时间能互相补偿，可以用提高温度来加速试验进程，再用在较高温度下得出的短时试验数据来外推出在较低温度下的长时数据。目前认为，这种方法比等温线法外推精度高。

影响钢材和焊缝金属持久强度的主要因素如下。

1）晶粒度　温度较低时，晶界强度高，故细晶钢材有较高的抗蠕变能力；温度较高时，由于晶界易于滑移，故晶界较少的粗晶材料有较高的抗力。

2）合金元素　铬钼钒等合金元素有阻碍位错运动的能力，故能提高持久强度，铬可强化固溶体；钒以强化晶界为主。一般说来，铬的强化作用小，但含铬的钢材及焊缝金属有较好的抗氧化性。碳的影响不明显，但在高碳情况下，短时强度高，但随着时间的增加，下降比较快；低碳时强度低，但下降则比较平缓。

3）析出相　耐热钢和耐热合金大多为析出时效硬化相和弥散硬化相的多相金属材料，析出相的作用在于提高持久强度，如 V_4C_3、VC、NbV 等，当 V/C=4 时，效果较好。

4）微观组织　对铬钼钒钢来说，微观组织对高温短时抗拉强度的影响较大，如上、下贝氏体组织和马氏体组织的高温短时抗拉强度要高于珠光体、铁素体组织，但微观组织对长时蠕变断裂性能的影响要小得多。因微观组织在蠕变过程中会发生变化，差距有所减小，改变了原有的强度特征。

5）预变形　常温下的预变形对提高持久强度有一定好处。焊接接头在焊接过程中一般均经一定的拘束变形，所以在这个意义上，焊接接头持久强度可能比单纯焊接热模拟的试样要高，有时断裂还可能发生在母材上，不过总的说来焊

接热影响区是一个薄弱环节。

下面介绍几种耐热钢材料焊接接头的持久强度。

1）12Cr1MoV 钢焊接接头的持久强度　12Cr1MoV 锅炉集箱环缝焊接采用手工焊和埋弧焊二种工艺方法，焊后经过 720℃ × 3 h 回火处理。表 9.3-23 列出了 12Cr1MoV 钢焊接接头的持久强度值，供参考。

表 9.3-23　12Cr1MoV 钢焊接接头的持久强度

工艺方法	焊接材料	取样	试验温度/℃	持久强度/MPa	
				10^4 h	10^5 h
手工焊	E5515 - B2 - V 焊条	焊缝	540	159	123
		焊接接头	555	113	94
埋弧焊	焊丝 H08CrMoV + 焊剂 350	焊缝	550	—	90
		焊接接头		—	110
埋弧焊	E5515 - B2 - V 焊条打底 H08CrMoV 盖面	焊接接头	540	129	105
				116	95
母材			540		128

2）2 ¼Cr - 1Mo 钢焊接接头的持久强度

2¼Cr - 1Mo 钢锅炉集箱焊接采用手工焊打底，埋弧焊盖面，表 9.3-24 列出了焊接接头的持久强度试验数据。

表 9.3-24　2 ¼Cr - 1Mo 钢焊接接头的持久强度

工艺方法	焊接材料	试验温度/℃	持久强度	
			10^4 h	10^5 h
埋弧焊	E6015 - B3 焊条打底	540	93	69
	H12Cr2Mo 焊丝盖面		97	73
母材	—	540	—	78

3）9Cr1Mo（VNb）高强度铁素体耐热钢焊接接头的持久强度　9Cr1MoVNb 钢焊接采用 GTAW 打底，手工焊盖面，钨极氩弧焊焊丝为日本 TG5 - 9Cb，焊条为 CM - 9Cb，焊后焊接接头经 750℃ × 1 h 回火处理。焊接接头与母材 600℃的持久强度如表 9.3-25 所示。

表 9.3-25　9Cr1MoVNb 钢焊接接头的持久强度

试样形式	持久强度/MPa	
	10^4 h	10^5 h
焊接接头拉伸持久	89.5	67.5
焊接接头管子内压持久爆破	140.0	127.0
母材拉伸持久	127.0	99.0

从表中可以看出，焊接接头的拉伸持久强度要低于母材，这是该钢焊接接头的主要特点，由于接头软化区与母材的持久强度有很大的差异，应变集中在薄弱的软化区，从而削弱了整体焊接接头的持久强度。

为解决这一矛盾，便出现了改良型 9Cr - 1Mo 钢（T/P91），这是一种单相马氏体钢，它是在标准 9Cr - 1Mo 钢的基础上采取了适当降低 C、S、P、含量，添加微量的 V、Nb、N 并严格调整了 Si、Ni、Al 的添加量。据有关资料介绍，改良型 9Cr - 1Mo 钢完全可以作为在高温区域使用的奥氏体系列不锈钢的替代材料，用于电站锅炉中的过热器管、再热器管等。这不仅可以降低成本，而且可以解决应力腐蚀、晶间腐蚀和异种钢焊接等问题。并可预期这种材料在将来电站设备中的应用会越来越广泛。

4）奥氏体耐热钢焊接接头的持久强度　奥氏体热强钢焊接接头的持久强度亦低于母材。焊接奥氏体耐热钢 T304H 时，常采用 H18 - 8Ti 氩弧焊丝打底，E0 - 19 - 10Nb - 15 焊条盖面，650℃ × 10^5 h 焊接接头的持久强度为 58 MPa，母材的持久强度为 69 MPa。

有人对 AISI316 钢焊接接头的不同区域进行了 600℃持久强度试验，试样分别取自焊缝金属、焊接热影响区、母材以及包括各个区域的焊接接头。试验最长时间达 2 × 10^4 h。结果表明：焊缝金属的断裂时间大约为母材的 1/3，即焊缝金属的持久强度大约为母材的 80%；热影响区的断裂时间比母材长 2 ~ 4 倍，或者说持久强度比母材高 130%；而对于包括焊缝等各区在内的接头试样，其断裂时间完全取决于焊缝金属的强度，接头试样的断裂时间几乎与纯焊缝金属试样相同。

（3）持久塑性

持久塑性是通过持久强度试验而测定的试样在断裂后的相对伸长率 δ 及断面收缩率 ψ。持久塑性是材料在高温下运行的一个重要指标，它反映了母材和焊缝金属在温度及应力长时间作用下所具有的塑性变形的能力。钢材的持久塑性远比高温短时拉伸时的塑性要小，特别是在低应力长时间作用下，断裂呈晶间低塑性开裂。因此，无论对钢材或焊缝金属来说，都要求有一定的持久塑性，以保证不发生脆性破坏。国外有的规范要求钢材的持久塑性不小于 5%。

（4）松弛性能

试样或零件在高温和应力状态下，如维持总应变不变，随着时间的延长自发地减低应力的现象称为松弛。松弛过程的主要条件是：

$$\varepsilon_{总} = \varepsilon_{弹} + \varepsilon_{塑} = 常数，T = 常数，\sigma \neq 常数$$

总的说来，松弛过程是弹性变形减小、塑性变形增加的过程，而且两者是同时、等量发生的，在松弛条件下工作的主要零部件有紧固件和弹簧等。同蠕变一样，松弛过程随温度的升高而加快。但蠕变是在恒应力下、塑性变形随时间的增加而增大；而松弛则是在总应变下，应力随时间的增加而降低。

焊接接头在松弛条件下工作较少，但在高温下工作的焊接接头有一个焊接残余应力本身的松弛问题，即随着温度的升高和时间的推移，未经回火处理接头的焊接残余应力将逐渐降低。同样回火热处理也是焊接残余应力的松弛过程，由于回火热处理温度通常均大大高于工作温度，所以应力消除也比较彻底。

4.4　焊接接头的高温氧化

在高温下运行的各种装置会受到空气中氧的作用而发生氧化腐蚀，同时也会受到其他气体介质如水蒸气、CO_2 和 SO_2 等的作用而发生腐蚀。

钢的氧化腐蚀程度及氧化速度与一系列因素有关，如温度、时间、气体介质的成分，压力和气体流速，钢的化学成分，形成的氧化膜及其化学和物理性能等。

就抗氧化性而言，氧化膜保护层的熔点、生成热和分解压力是至关重要的。熔点愈高，生成热愈大和分解压力愈小，则氧化膜保护能力愈强，金属抗氧化性愈好。铬、硅和铝是耐热钢及其合金中形成稳定氧化膜保护层的主要元素，尤以铬的氧化膜最为致密，能阻止氧化及金属原子的继续扩散。因此，一般耐热钢中均含有铬和硅等元素。此外，在金属表面渗铝或铬，或进行喷涂，均是提高抗氧化性的有效手段。

对焊接接头来说，由于焊缝的化学成分与母材相似，所以焊接接头一般不存在特殊的抗氧化问题。



在一般空气介质下，各类钢种在长时间运行中的最高抗氧化温度为：

碳素钢	500℃
低合金耐热钢	500～620℃
（与钢中 Cr、Si 含量有关）	
Cr5%马氏体钢	600℃
高铬铁素体钢	850～1 100℃
Cr12%钢	800℃
18－8 型铬镍奥氏体钢	850～900℃
25－13 型铬镍奥氏体钢	1 100～1 150℃
高镍钢及高镍合金	1 000～1150℃

钢的抗氧化性可用试样在氧化期间的质量变化或厚度变化来表示。国标规定钢的氧化试验有失重法和增重法等数种。以氧化过程稳定速度计算的质量损失 $K_{失}$ 按下式计算：

$$K_{失}=\frac{W_0-W_1}{St}$$

式中，W_0 为试验前试样质量，g；W_1 为试验后试样去氧化皮后质量，g；S 为试样表面积，m^2；t 为试验时间，h。若用增重法试验，必须分析氧化皮的成分，才能将增重量约略地换算成失重量。

$$K_{失}=\lambda K_{增}$$

式中，$K_{增}$ 为稳定速度计算的质量增加，g/（$m^2\cdot h$）；λ 为与氧化皮成分有关的系数（λ 大致在 2.3～3.5 范围内）。

以年腐蚀深度指标表示的氧化速度可由下式计算：

$$v=8.76\times\frac{K_{失}}{\rho}$$

式中，v 为以年腐蚀深度表示的氧化速度，mm/a；ρ 为试样密度，g/cm^3；

钢材的抗氧化性级别分为 1～5 五个等级，如表 9.3-26 所示。表 9.3-27 列出了两种低合金耐热钢氧化速度。

表 9.3-26　钢材的抗氧化性级别

级别	氧化速度/$mm\cdot a^{-1}$	抗氧化性分类
1	≤0.1	完全抗氧化性
2	＞0.1～1.0	抗氧化性
3	＞1.0～3.0	次抗氧化性
4	＞3.0～10.0	弱抗氧化性
5	＞10.0	不抗氧化性

表 9.3-27　两种耐热钢的氧化速度

钢　种	温度/℃	氧化速度/$mm\cdot a^{-1}$
12Cr1MoV	580	0.05～0.10
	600	0.12～0.22
12Cr2MoWVTiB	580	≤0.06
	600	≤0.08
	620	≤0.10

4.5　焊接接头的热疲劳

热疲劳是由热应力和热应变作用所产生的疲劳现象。

由于温度循环变化而引起的附加应力称为热应力。它可以因外拘束或温差而产生。温度循环变化越大，即上、下限温差越大，则热应力就越大；热应变则是由于温度改变而引起的应变，材料的导热系数愈低，加热和冷却速度愈快，则热应变也愈大。

热应力的大小与材料的热膨胀系数成正比，在焊接时，特别要考虑到材料的匹配，由铁素体与奥氏体异种钢焊在一起的接头，因膨胀系数相差较大，所产生的热应力也大，因此容易产生热疲劳。

在相同的塑性应变条件下，热疲劳比机械疲劳的循环次数要少（如温差为 350℃的热疲劳），这说明热疲劳的工况条件是相当苛刻的。

影响热疲劳的因素主要有以下几点。

1）最高加热温度　对 CrMoV 钢及其焊接接头的试验表明，随着最高加热温度的提高，热疲劳强度迅速降低，当最高加热温度高到足以引起组织变化时，其影响更大。

2）加热和冷却速度　快速加热和冷却时的热疲劳寿命最低，相比之下，快速加热对材料的热疲劳寿命影响更大。

3）组织状态　热疲劳强度与组织状态有很大关系，如果材料在使用过程中组织不稳定，往往会使疲劳强度降低，对合金钢及其焊接接头而言，裂纹在细晶粒组织中的扩展速率一般要小一些。

有人对 2¼Cr－1Mo 低合金钢＋E309L 焊缝金属＋18－8 不锈钢的焊接接头在最高温度为 400～600℃范围内进行过热疲劳试验。一组试样为焊后状态，另一组为 700℃×10 h 焊后热处理状态，试验结果表明，当最高温度为 600℃时，试样经上千次热循环就发生了断裂；当最高温度为 400℃时，疲劳次数可增加到 10^4 次以上。此外，焊后状态焊接接头的热疲劳寿命比焊后回火处理的焊接接头要长。

5　环境加速焊接结构失效典型事例及其分析

（1）奥氏体不锈钢设备应力腐蚀破裂失效分析

某炼油厂自 1988 年投产使用一套 18－8 不锈钢焙烧炉设备至 1994 年，四次发生沿炉体环焊缝热影响区断裂，如图 9.3-36 所示。后将 18－8 不锈钢更换成抗腐蚀性更好的 316L 不锈钢，可是仍然无法防止断裂的发生。

1）断口分析　从图 9.3-36 可以看出，裂纹产生于环焊缝的热影响区上两侧，当裂纹扩展至临界长度时，穿过焊缝失稳扩展，导致整个炉体最终断裂。图 9.3-37 是断口的金相照片，可以看出，裂纹均沿晶发展，呈网状、龟裂形式，属于典型的晶间腐蚀并导致应力腐蚀断口。由于裂纹产生时间相当长，在断口上裂纹的稳定扩展区，因介质的腐蚀覆盖有一层厚厚的腐蚀产物。

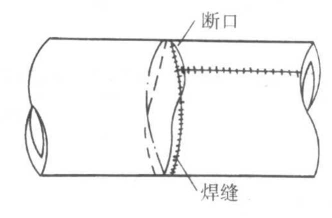


图 9.3-36　奥氏体不锈钢炉体宏观断口示意图



图 9.3-37　断口金相照片　（×200）



2）分析鉴定　该炉体工作于富 Cl^- 离子介质中，介质的 pH = 3 ~ 5。断口分析及电化学试验表示：该奥氏体不锈钢炉体的失效属于 Cl^- 离子引起的应力腐蚀破裂。经检查发现，在炉体安装过程中，在焊接环焊缝时使用了支撑垫板，焊后未作任何处理遗留在炉体内。由于支撑垫板焊缝与环焊缝垂直，造成了三轴焊接残余应力，同时还会引起腐蚀介质及 Cl^- 离子在此处聚集、浓缩，焊缝及热影响区处于高浓度的腐蚀介质中，易于产生晶间腐蚀及应力腐蚀。因此，遗留在炉体内的支撑垫板是造成该炉体应力腐蚀失效的重要原因。此外，在炉体环焊缝焊接过程中使用了较大的焊接规范，焊接速度慢，焊条摆动大，这对于奥氏体不锈钢的焊接来说，是非常忌讳的。

3）结论　失效是由于奥氏体不锈钢在 Cl^- 离子介质中发生应力腐蚀引起的。

4）建议　去除炉体中的支撑垫板；在环焊缝的焊接过程中，要严格控制焊接规范，保证焊接质量。

（2）3×10^5 t 合成氨设备中 17CrNi2 钢焊接接头的刀蚀失效

某化肥厂 3×10^5 t 合成氨设备的压缩机转子采用 Cr17Ni2 钢制造，转子由四级叶轮组成，叶轮的上、下盖板与叶片之间的连接，采用丁字形焊接接头，手工电弧焊完成，选用焊条奥 302，ϕ3.2 mm，焊前预热 200 ~ 300℃，焊后经 670 ~ 690℃，2 h 整体去应力处理。

该设备投入运行后，在不到一年的时间内，发现叶轮上的角焊缝沿熔合线处有严重的腐蚀现象。在腐蚀最严重处，焊缝金属几乎与母材脱离，并且下盖板的腐蚀比上盖板更为严重。结果造成被迫停机检修，给生产带来很大的影响，在经济上造成了巨大的损失。

1）分析鉴定　在焊接接头上沿熔合线的局部集中腐蚀即刀蚀，就其本质讲是晶间腐蚀的一种特殊形式。采用奥氏体不锈钢焊条（奥 302）焊接马氏体 - 铁素体型不锈钢（Cr17Ni2）时，由于焊缝与母材成分及性能的差异，造成两者间的电极电位差，这是引起刀蚀的重要原因之一；焊接时，熔合线附近的晶粒沿晶界处出现了铬的碳化物析出，造成晶界局部贫铬区，电极电位出现跳跃式的降低，这是造成刀蚀的主要原因；在焊接高温下，含碳量较高而碳的溶解度较小的母材侧的碳，必然会向含碳量低而碳的溶解度较大的奥氏体焊缝中扩散，由于焊接时冷却速度大，碳来不及均匀化，造成了熔合线焊缝侧出现增碳层，增碳层出现后，沿增碳层就会有铬的碳化物析出，引起局部贫铬区，因此，熔合线焊缝侧增碳层的出现是产生刀蚀的又一重要原因。

研究表明，通过调整焊后热处理规范可以减轻、甚至避免刀蚀的发生。适当提高焊后热处理温度，延长保温时间，有利于铬的扩散，使贫铬区的铬得到补充，金属处于二次稳定化状态，对抗刀蚀是非常有利的。在制订焊接工艺及热处理规范时，应该避开 300 ~ 550℃这一敏感温度范围。

2）结论　该设备的失效是由刀蚀引起的，严格控制焊接工艺及焊后热处理规范可以防止刀蚀的发生。

3）建议　采用奥 302 焊条焊接 Cr17Ni2 钢时，预热 250℃，严格控制层间温度，焊后经 680℃，16 h 的二次稳定化处理。

（3）锅炉汽包的腐蚀疲劳失效分析

电站锅炉汽包是锅炉的重要设备之一，由于其容积大、温度和压力高，是锅炉安全运行的重点之一。然而，国内有许多锅炉汽包几十年来从未进行过检查，有研究单位曾对 80 余台汽包进行过检验，结果发现有 60% 汽包存在超标缺陷，其中 50% 为裂纹，严重地威胁到了设备及人身安全。

某厂 10 t 锅炉在运行 4.5×10^4 h 后，于 1995 年大修期间发现汽包有渗漏现象，经打磨发现汽包内壁环焊缝上有明显的垂直于焊缝的横向裂纹。

该锅炉有上、下两个汽包如图 9.3-38 所示，材料为 SB42N（相当于 20 g），工作温度 10^5 ℃，饱和温度 229℃。上、下汽包内径分别为 1 200 mm、900 mm，筒节壁厚分别为 28 mm、22 mm，封头壁厚分别为 26 mm、20 mm。上汽包有 *A*、*B*、*C*、*D* 四条环焊缝，下汽包有三条环焊缝，查阅制造厂方图纸资料得知，该汽包焊后未进行过热处理。

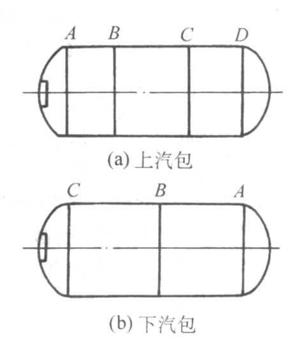


图 9.3-38　汽包结构示意

1）宏观检验　对上、下汽包所有焊缝进行磁粉探伤发现，所有环焊缝上均有长度不等的裂纹，裂纹深度不等，且有少量裂纹已穿透壁厚。

2）微观检验　化学成分分析结果表明母材的化学成分符合日本 JIS 相应标准。金相试验分析表明：裂纹的宽度均匀，裂纹内充满了腐蚀产物，有分叉，主裂纹萌生于腐蚀坑，裂纹穿晶发展。汽包内壁表面腐蚀坑内有许多垂直于表面且平行发展的微裂纹。

3）断口分析　将断口制成试样，用超声波对裂纹表面进行清洗，然后进行扫描电镜分析，结果如图 9.3-39 所示。从图中可以看出裂纹表面有细小的韧窝，并由韧窝停顿形成了疲劳条纹。

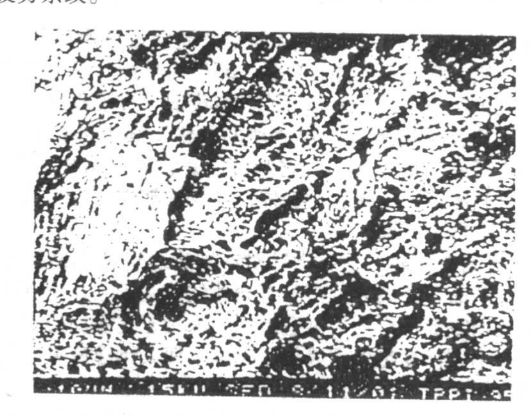


图 9.3-39　断口扫描电镜照片　（×320）

4）分析与结论　裂纹为穿晶型裂纹，有分叉，裂纹内及末端有腐蚀产物，汽包内壁有许多蚀坑及微裂纹，同时，在电镜下可以观察到明显的疲劳条纹。由此可以断定该汽包的失效是由于腐蚀疲劳引起的。

交变应力是锅炉运行过程中启、停炉及给水温差等原因引起的，而炉水渗入汽包则为汽包的腐蚀疲劳提供了介质。还应该指出的是汽包焊后未进行热处理便投入了使用，焊缝及近缝区的残余拉伸应力水平是很高的，这不仅增大了裂纹尖端的应力场，同时促进了环境对金属材料的破坏作用。

编写：潘希德（西安交通大学）
薛　锦（西安交通大学）

第4章　焊接结构的再制造与延寿技术

在20世纪全球经济高速发展的同时，对自然资源的任意开发利用造成了全球的生态破坏、资源短缺、环境污染等重大问题，其中机电产品制造业是最大的资源使用者，也是最大的环境污染源之一。据统计，造成全球环境污染的70%以上排放物来自制造业，它们每年约产生55亿吨无害废物和7亿吨有害废物。为尽可能减少大量废旧产品对环境的危害、最大限度地利用废旧产品的附加值，再制造工程在国际上应运而生。通过发展再制造工程理论和技术，可以延长产品的使用寿命，提升产品性能，节约能源，保护环境，实现废品资源化，符合国家可持续发展战略的绿色系统工程。纳米表面工程作为再制造工程的关键技术，对再制造工程的推广应用具有重要作用。

1　再制造工程概述

产品经过长期的服役后，将会因“到寿”而报废。判定产品是否“到寿”有以下几个原则：产品的性能是否因落后而丧失使用价值，即是否达到产品的技术寿命；产品结构、零部件是否因损耗而失去工作能力，即是否达到产品的物理寿命；产品继续使用或储存是否合算，即是否达到产品的经济寿命；产品是否危害环境、消耗过量资源，即是否符合可持续发展。目前，对待报废产品处理的方法大多采用再循环处理，但所获得的往往是低级的原材料，同时也造成了一定的资源和能源的浪费。世界各国都在积极研究和探寻有效地利用资源、最低限度地产生废弃物的处理报废产品的合理方法。在这种形势下，产生了全新概念的再制造工程。

1.1　再制造工程的概念

再制造工程是一个以产品全寿命周期设计和管理为指导，以优质、高效、节能、节材、环保为目标，以先进技术和产业化生产为手段，来修复或改造废旧（报废或过时）产品的一系列技术措施或工程活动的总称。其中再制造的对象——“产品”是广义的。它既可以是设备、系统、设施，也可以是其零部件；既包括硬件，也包括软件。再制造加工包括以下的两个方面。

1）再制造恢复　主要指针对达到物理寿命和经济寿命而报废的产品，在失效分析和寿命评估的基础上，把有剩余寿命的废旧零部件作为再制造毛坯，采用先进表面技术、快速成形技术、修复热处理等加工技术，使其迅速恢复原技术性能和应用价值，形成再制造新产品的工艺过程。

2）再制造改造　主要指针对已达到技术寿命的过时产品，或是不符合可持续发展要求的产品，通过技术改造、更新，特别是通过使用新材料、新技术、新工艺等，提高产品技术性能、延长使用寿命、减少环境污染、优化资源回收。

图9.4-1是再制造在产品全寿命周期中的位置，产品的全寿命周期包括论证设计、制造、使用、维修、报废五个环节，再制造是产品维修、报废阶段的一种再生处理，是对现有制造概念的延伸和革新。首先，通过对废旧产品进行再制造可获得重新利用的合格零部件，使产品在全寿命周期的闭环系统中形成物质流循环。其次，在对废旧产品再制造的过程中，通过分析其失效形式，可以发现产品缺陷，并将该信息反馈到研制和维修管理部门，形成信息流。通过再制造的研究，可形成闭环的产品物质流及信息流系统，实现由材料循环使用，发展到产品循环使用的高级阶段，实现高级资源流的最优化循环。再制造工程不但能延长产品的使用寿命，提高技术性能，还可以为产品设计、改造和维修提供信息，最终达到产品的全寿命周期费用最合理，最大限度发挥产品的作用。

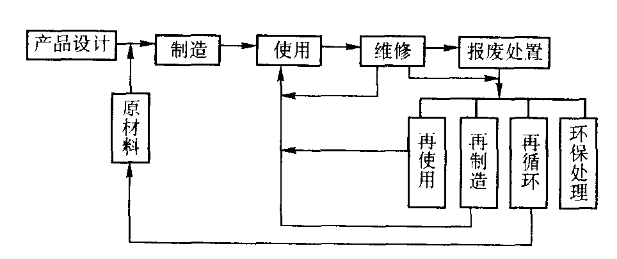


图9.4-1　再制造工程在产品全寿命周期中的位置

再制造不同于维修。维修是在产品的使用阶段为了保持其良好技术状况及正常的运行而采取的技术措施，常具有随机性、原位性、应急性。维修的对象为有故障的产品，多以换件为主，辅以单个或小批量的零部件的修复。其设备和技术一般相对落后，而且形不成批量生产。维修后的产品多数在质量性能上难以达到新品水平。而再制造是将大量相似的报废产品回收到工厂拆卸后，按零部件的类型进行收集和检测，以有剩余寿命的报废零部件（不排除修理时更替下来的失效零部件）作为再制造毛坯，利用高新技术对其进行批量化修复、性能升级，所获得的再制造新产品在技术性能上和质量上都能达到甚至超过新品的水平。此外，再制造是规模的生产模式，它有利于生产自动化和产品的在线质量监控，有利于降低成本、降低资源和能源消耗、减少环境污染，能以最小的投入获得最大经济效益。显然，是再制造使维修和报废处理得到跨越式发展。

再制造不同于再循环。再循环是狭义的“回收”，它是传统的“回收”概念。再循环一般用于可消费品（如报纸、玻璃瓶、铝制易拉罐等），也可用于耐用品（如汽车发动机、机电产品等）。一旦这些商品被废弃以后，就可以进行再循环，即把它们从废物流中移出，通过回炉冶炼等加工返回到原材料的形式。再循环减少了废弃垃圾的数量，增加了地球上的可用的原材料资源。再制造是广义上的“回收”概念，是最大限度重新利用报废产品的“回收”方式。美国波士顿大学的Robert T. Lund教授在其专著《美国前沿：影响制造业的潜在财富》中写到：“再制造区别于再循环，因为再循环所回收的只是原材料本身价值，而再制造重新获得了产品的附加值。”产品附加值是指在产品的制造过程中加入到原材料成本中的劳动力、能源和加工设备损耗等成本。一般来说，产品的附加值要远远高于原材料成本。如玻璃瓶，其原材料成本不超过产品成本的5%，另外的95%则是产品的附加值。再循环不但不能回收产品的附加值，而且还需要增加劳动力、能源和加工成本，才能把报废产品转变成原材料。而再制造由于能回收产品的附加值，能使产品具有同于甚至高于新品的性能和质量，因而其生产成本要远远低于用再循环所得原材料制成的新品成本。这正是再制造被认为是最优的“回收”方式的原因。

1.2　再制造工程的地位、作用和影响

（1）再制造工程是对先进制造技术的补充和发展

先进制造技术是制造业不断吸收信息、机械、电子、材料技术及现代系统管理的新成果，并将其综合应用于产品的



设计、制造、使用、维修乃至报废处理的全过程，以及组织管理、信息收集反馈处理等，以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活生产，提高对动态多变的产品市场适应能力和竞争能力，获得最佳的技术效益和经济效益的一系列通用的制造技术。世界各国都把先进制造技术列为重点发展的科技项目。我国政府也十分重视先进制造技术的发展，已经把先进制造技术列为21世纪的六项关键技术之一。再制造工程与先进制造技术具有同样的目的、手段、途径及效果，它已成为先进制造技术的组成部分。

再制造工程是在报废的或过时的产品上进行的一系列修复或改造活动，要恢复、保持、甚至提高产品的技术性能，有很大的技术难度和特殊的约束条件。这就要求在再制造过程中必须采用比原始产品制造更先进的高新技术。实际上，再制造工程的关键技术，如再制造毛坯快速成形技术、各种先进表面技术、纳米复合及原位自愈合生长技术、修复热处理技术、应急维修技术、过时产品的性能升级技术等，都属于高新技术范畴。再者，一些重要的产品从论证设计到制造定型，直到投入使用，其周期往往需要十几年甚至几十年的时间，在这个过程中原有技术会不断改进，新材料、新技术和新工艺会不断出现。再制造产业能够在很短的周期内将这些新成果应用到再制造产品上，从而提高再制造产品质量、降低成本和能耗、减小环境污染，同时也可将这些新技术的应用信息及时地反馈到设计和制造中，大幅度提高产品的设计和制造水平。可见，再制造工程在应用最先进的设计和制造技术对报废产品进行修复和改造的同时，又能够促进先进设计和制造技术的发展，为新产品的设计和制造提供新观念、新理论、新技术和新方法，加快新产品的研制周期。再制造工程扩大了先进制造技术的内涵，是先进制造技术的重要补充和发展。

(2) 再制造工程是全寿命周期管理工作的延伸

目前，国内外越来越重视产品的全寿命周期管理。传统的产品寿命周期从设计开始，到报废结束。全寿命周期管理要求不仅要考虑产品的论证、设计、制造的前期阶段，而且还要考虑产品的使用、维修直至报废品处理的后期阶段。其目标是在产品的全寿命周期内，使资源的综合利用率最高，对环境的负影响最小，费用最低。再制造工程在综合考虑环境和资源效率问题的前提下，在产品报废后，能够高质量地提高产品或零部件的重新使用次数和重新使用率，从而使产品的寿命周期成倍延长，甚至形成产品的多寿命周期。因此，再制造工程是产品全寿命周期管理的延伸。

再制造性设计是产品全寿命周期设计的重要方面。在以往的产品开发过程中，大多采用顺序工程设计和并行独立设计，对产品投入使用后的维修和报废后的处理在设计阶段考虑过少。而全寿命周期设计是一个系统集成的设计，它以并行的方式设计产品及其相关过程，要求设计人员在一开始就自觉地考虑产品整个生命周期从概念形成到产品完全报废处理的所有因素。全寿命周期设计不仅包括可靠性共性设计（加工性设计、可靠性设计、维修性设计、保障性设计、安全性设计、检试性设计等），而且应该包括再制造性设计（如可拆卸可装配性设计、模块化设计、通用性设计、可再制造加工性设计、性能升级性设计，材料可重复利用性设计）以及产品的环保处理设计等。确保产品的可再制造的特性，并使其对环境负影响最小，以利于可持续发展，关键在于产品设计、在于设计所赋予的产品结构和性能特征。产品的再制造性设计，使产品在设计阶段就为后期报废处理时的再制造加工或改造升级打下基础，以实现产品全寿命周期管理的目标。

(3) 再制造工程是实现机电产业可持续发展的重要技术支撑

20世纪是人类物质文明飞速发展的时期，也是地球环境和自然资源遭受最严重破坏的时期。环境污染和生态失衡在20世纪末已经成为显性危机，成为制约世界经济可持续性发展，危胁人类健康的主要因素之一。保护地球环境、实现可持续发展，已成为世界各国共同关心的问题。我国1994年公布的《中国二十一世纪议程》中对清洁生产作出了明确的规定，要求在今后的生产中做到“废物减量化、资源化和无害化，或消灭于生产过程中”。

可持续发展包括以下重要原则：发展的持续性，即现代的发展不能影响、损坏未来的发展能力；发展的整体性和协调性，即人的繁衍、物质的生产、自然界对于人类生活资源和生产资源的产出等几方面构成一个巨型系统，任何一方面不畅通都会危害世界的持续和发展。而我国目前的工业生产模式不符合可持续发展的方针，主要表现为：环境意识淡薄，回收、再利用意识差，大多是“先污染，后治理”；只注重降低成本，而不重视产品的耐用性和可再利用性，浪费严重。我国面临的资源和环境问题更为突出，一是资源能源短缺，地下矿产等资源的人均拥有量只相当于世界人均水平的1/4～1/3；二是环境污染严重。据世界银行专家估计，我国由于水、空气污染造成的经济损失每年为540亿元，相当于1995年国民生产总值的8%。发展生产和保护环境、节省资源已经成为日益激化的矛盾，解决这一矛盾的唯一途径就是从传统的制造模式向可持续发展的模式转变，即从高投入、高消耗、高污染的传统发展模式向提高生产效率、最高限度地利用资源和最低限度地产出废物的可持续发展模式转变。再制造工程就是实现这样的发展模式的重要技术途径之一。

再制造工程在生态环境保护和可持续发展中的作用，主要体现在以下几个方面。

① 通过再制造性设计，在设计阶段就赋予产品减少环境污染和利于可持续发展的结构、性能特征。

② 再制造过程本身不产生或产生很少的环境污染。

③ 再制造产品比制造同样的新产品消耗更少的资源和能源。

(4) 再制造工程将成为一个新的经济增长点

据发达国家统计，每年因腐蚀、磨损、疲劳等原因造成的损失约占国民经济总产值的3%～5%，我国每年因腐蚀造成的直接经济损失达200亿元。我国有几万亿元的设备资产，每年因磨损和腐蚀而使设备停产、报废所造成的损失都愈千亿元。面对如此大量设备的维修和报废后的回收，如何尽量减少材料和能源浪费、减少环境污染，最大限度地重新利用资源，已经成为亟待解决的问题。再制造工程能够充分利用已有资源（报废产品或其零部件），不仅满足可持续发展战略的要求，而且可形成一个高科技的新兴产业——再制造产业，能创造更大的经济效益。

随着人们对可持续发展战略重要性的认识，世界许多国家都在采取相应的措施，如许多国家都制定了产品的生态标志。国际标准化组织也提出了ISO 14000系列标准，对未能取得ISO 14000认证的企业产品禁止或限制进入市场流通，以保证产品的“环境竞争力”。在经济全球化蓬勃发展的今天，我国面临进入WTO新的经济发展的机遇和挑战。在这股全球性的“绿色浪潮”下，我国的传统制造业所面临的形势格外严峻。发展再制造产业是应付这种挑战的一种有效手段。使用再制造产品将使制造业降低成本、节约资源、减少污染，是提高产品竞争能力的重要途径。与此同时，随着产品更新换代和企业重组，我国数十年建设所积累的价值数万亿元的设备、设施，正在经历着或面临着改造更新的过程，尤其是我国20世纪70年代末以来引进的大量成套设备也面临或接近着到寿、报废的问题。再制造工程不仅能够延长现



役设备的使用寿命，最大限度发挥设备的作用，也能够对报废或即将报废的设备进行高技术改造、整体翻新，赋予旧设备更多的高新技术含量，使其赶上时代前进的步伐；它是以最少的投入而获得最大的效益的回收再利用方法。同时，发展再制造产业，也能够为专业技术人员和工人创造更多的就业机会，减轻下岗人员对社会的压力。再制造工程在21世纪将为国民经济的发展带来巨大的效益，可望成为新世纪新的经济增长点。

1.3 再制造工程的国外发展现状

1984年美国罗伯特教授在《技术评论》杂志发表"再制造"一文，开始提倡旧品翻新或再生。80年代日本也提出了"再生工厂技术"的概念。目前国外已经对再制造的工业应用及在产品全寿命周期循环中的作用进行了大量的探讨研究，并初步形成了较大的行业规模。

国外汽车产品的再制造是研究最早的领域，并已经形成较完整的系统体系。美国汽车工程师协会（SAE）多次举办以"全寿命周期管理"和"再制造"为主题的学术会议，并对一些具体零部件的再制造制定了标准。美国汽车发动机产品再制造协会（PERA）每月都出版关于再制造产品的快报，并主办《汽车再制造》杂志。1993年，福特、通用、克莱斯勒等大汽车公司结成回收联盟，建立了汽车拆卸中心，专门研究汽车零部件的拆卸、再制造和再循环。有报道，福特汽车公司已建立一个旧部件交流中心，从环保出发，充分利用回收再制造的部件，一年将实现10亿美元的营业额。2000年，欧盟委员会规定，从2002年起，废旧汽车的可再生利用率达到85%，到2015年达到95%。目前国外对再制造工程的研究主要为在政府的政策引导下，以各个行业的大公司为生力军，着重于对废旧产品进行回收，并已经建立了较为完善的回收体系。

国外再制造已形成相当规模的产业，分散于各个行业，目前已经建立了有关汽车、轮胎、计算机、办公家具、压缩机、复印机、机床、硒鼓等领域的再制造体系。1996年在美国Argonne国家实验室的资助下，Robert T. Lund教授主持了对美国的再制造业的深入调查，撰写了研究报告《再制造业：潜在的巨人》，建立了一个庞大的再制造公司的数据库：美国专业化再制造公司数量超过73000个，每年的销售额超过530亿美元，直接雇员48万人。

发达国家政府充分认识到了发展再制造的重要意义，并建立了相关的法规。2000年11月15日，美国前总统克林顿宣布将当日定为"美国再循环日"并指出：产品再循环不但可以节约资源和能源、降低水和空气污染、减少温室气体排放，而且还能够建立新的经济增长点，创造更多的就业机会。日本于2000年提出了"循环型社会"即"3R行动"的构想，制定了多部相关法律，如《家用电器再生法》、《建设再生法》等。资料表明，发达工业国家政府部门已经对再制造的研究给予了高度重视。

1.4 再制造工程的国内发展现状

目前再制造工程已经得到我国政府及各相关单位的高度重视，越来越多的单位投入到再制造研究领域。中国工程院2000年设立了咨询项目"绿色再制造工程及其在我国的应用前景"，项目负责人徐滨士院士在总结报告中提出了再制造工程概念并进行了系统的论证。该报告受到国务院有关领导的重视，并被批转给相关部委参阅。在2002年出版的全国干部学习读本《21世纪干部科技修养必读》一书中，强调环境保护技术的重要发展方向是"从回收利用废物向再制造发展"，并指出"回收利用是产品完成寿命周期后，将其毁掉，以回收利用它的材料。再制造是从废弃的产品中取出部件，对它们进行检验、翻新，然后再次利用。回收利用，如熔化废钢铁、溶解废纸张，需要耗费能源并污染环境，而且通常产生低级材料；再制造，取出部件重新使用，则是一种获得高价值的合理方法。重新使用零件比回收利用零件更便宜。为此，要求工程师在设计产品时，把'再制造'作为一个目标，使产品的某些部件达到'再制造'的标准。"

为加大对再制造基础研究支持力度，2002年，国家自然科学基金委将《再制造基础理论与关键技术》列为自然科学基金重点资助项目，极大地促进了对再制造基础理论和关键技术的研究。2003年"机械装备自修复和再制造"被列入国家中长期发展规划的专题研究；目前军队已开始了部分装备再制造的推广应用试点。

我国在再制造技术研究应用方面也取得了初步的成绩。再制造技术国家重点实验室已于2003年正式建成。清华大学、重庆大学等院所和企业正在开展有关绿色制造、面向3R的设计、产品全生命周期工程等研究，并瞄准了轿车、摩托车、电冰箱、计算机、空调等产品的回收再制造。装甲兵工程学院、中科院兰州化学物理研究所等单位使用表面工程技术进行设备零部件的再制造研究和应用，对装甲车辆、舰艇的延寿作了大量的试验和研究工作。在海军猎潜舰上推广新型电弧喷涂防腐技术，使猎潜艇钢结构的防腐寿命由5年提高到15年；应用等离子喷涂技术对重载车辆零件进行了再制造修复与改造，实车考核证明经再制造的零部件比新品的寿命提高2~3倍；对首钢从比利时购进的二手连铸设备中的三百多件大轴承座和轧辊，进行了再制造修复和表面强化，已正常使用了数年。

目前我国对废旧装备的再制造改造已得到了广泛的研究应用，在实验仪器、电子设备等诸多领域开展了再制造升级活动。例如原子吸收光谱仪作为元素分析的主要仪器广泛应用于各个领域，发挥着巨大的作用。我国早期进口的原子吸收光谱仪，数据处理部分极为落后，并且由于长期使用，故障率较高，已无法满足目前分析测试的要求，然而购置新仪器又往往价格昂贵。江苏省大型仪器协作共用及维修服务指导中心对1台1979年进口的日本日立公司的原子吸收光谱仪进行了升级，其中使用先进的计算机控制技术，取代原仪器故障频繁的数据处理及记录部分，使升级改造后的仪器在分析精度、分析速度、自动化程度等方面大大提高。此种再制造升级技术有极好的通用性，可用于20世纪80年代初期生产的各种型号的原子吸收光谱仪。

我国的再制造工业也首先在汽车领域得到了开展。1994年，经外贸部、机械工业部、海关总署联合批准，中国重型汽车集团公司与英国的Sandwell公司合资创办了济南复强动力有限公司，专门从事汽车发动机再制造。上海大众联合发展有限公司引进了德国大众发动机再制造技术和标准，目前生产的桑塔纳系列再制造发动机产品都已通过国家内燃机质量监督检验中心的形式试验，2001年通过了TUV南德意志集团ISO 9002质量体系认证。为防止假冒伪劣及拼装产品，再制造发动机在保证与新机一样的性能、质量、售后条件和索赔条件的情况下，打上再制造产品的标记，作为上海大众纯正配件，已纳入上海大众汽车销售公司的销售和维修服务网络。

再制造工程在我国有着广阔的应用领域。据报道，我国设备资产达几万亿元，许多大型成套设备，特别进口的成套设备，从2001年开始就陆续到寿、面临报废。现在每年报废的电视机、计算机等大件电器电子类产品达到2 600万件，而且随着技术更新换代的加快，废旧产品报废的数量在

逐年增加。如果对这些废弃产品处理不当，将造成大量的资源浪费、环境污染、安全隐患。但在产品报废时，如果能够采用优质、高效、节能、节材、环保的先进再制造技术，不仅能够恢复产品原技术性能，而且通过实时引用新技术、新工艺和新材料，可以达到性能升级，获得质优价廉、“与时俱进”的再制造产品，实现产品循环。而且再制造可以回收产品中巨大的附加价值，如废旧发动机如果回炉，其再利用价值只相当于原机的 3%，而再制造可以使原机 85%的价值得到循环应用。由此可见，再制造工程在我国有广阔的应用前景，这是一个潜在的、巨大的产业的市场，是我国 21 世纪中新的经济增长点。随着再制造工程的不断推广应用，其必将在我国实现可持续发展战略中发挥突出作用，实现我国资源、环境、社会的良性循环发展。

1.5　再制造工程的巨大效益

(1) 资源效益

再制造工程能够节约大量的材料和能源。由于再制造是直接利用产品的零部件进行生产，所以原产品第一次制造中的大部分材料（约 85% ~ 95%）和能源（约 85%）得到了保存，而且减少了因产品零件生产所需材料和能源对原生矿的开采。

每年全世界再制造业节省的材料达到 1 400 万吨，可以装满 23 万节火车车厢，排列起来长 1 650 mile（1 mile = 1.6 km）；全世界每年再制造节省 400 万亿 Btu（1 Btu = 1 055.06 J）能量，相当于 8 个平均规模核电厂的年发电量，或者 1 600 万桶原油，能够维持 600 万辆客车运行 1 年。据工业专家称，每用于再制造 1 tb（1 tb = 0.45 kg）新材料，可以节省 5 ~ 9 tb 原材料；再制造产品生产所需能源是新产品所需的 1/5 ~ 1/4。据估计，如果固定设备制造商和汽车制造商能够分别对他们产品的 20%和 10%进行再制造，则美国的再制造业可以增长 200%，这等于减少全美国产品制造链中所需要能量的 5% ~ 10%。

再制造已经被作为节约材料和能源的一颗“新星”。例如，再制造的汽车部件保存了原产品 85%的能源，再制造发动机仅要求新品生产 50%的能源；翻新一个客车轮胎仅需要 26 L 油，而新轮胎需要 83 L 油，美国 1996 年仅翻新轮胎节约 14.7 亿升油；新的汽车起动器比再制造汽车起动器所用能量多 11 倍，再制造交流发电机是新品所用能量的 1/7，两者再制造产品所用材料分别是新品所用材料的 12%和 11%；再制造一个硒鼓可以节省 2.3 L 石油。复印机再制造中每利用 1 t 铜，可以节约 200 t 铜矿石，1 t 用于采矿的炸药，0.5 t 用于浮选的化学制剂，1 t 用于熔化的焦碳或油。

(2) 环保效益

再制造工程使大量的废旧产品得到了再生，减少了掩埋土地使用量和直接掩埋对环境造成的污染，而且再制造加工避免了采用再循环等效益低的回收方式处理时对环境的二次污染。例如一个硒鼓一般有 3 tb 塑料，塑料掩埋后需要 100 多年才能生物降解，2001 年美国约再制造了 200 万个墨鼓，减少了 600 万磅的掩埋量。

1998 年中国环境污染状况备忘录中指出，造成全球环境污染的 70%以上排放物来自制造业，它们每年约产生 55 亿吨无害废物和 7 亿吨有害废物。由于再制造生产是从零部件开始，减少了零部件本身的加工，从而大大减少了产品生产过程中对环境的污染和危害。再制造已被看作减少温室气体排放量、改善气候的一个重要因素。每年再制造节约的能源减少了 2 800 万吨 CO_2 气体的产生，相当于 10 个 500 MW 特燃煤发电站的产生量。美国曾对钢铁材料的废旧产品再生产的环境效益进行了分析，其中能够减少大气污染 86%、水污染 76%、固体废物 97%，节约用水量 40%。施乐 5100 型复印机再制造相对制造过程排放的废水为 18%、固体废物 38%、CO_2 等废气 23%；每再制造利用 1 t 铜，不但节省了大量固体有害废物的产生，而且减少 3 t CO_2 和 2 t SO_2 的产生。

(3) 社会经济效益

再制造工程的社会经济效益表现在多个方面。

其一是：再制造是一个巨大的产业，能够创造可观的经济收入。例如美国 1996 年的再制造销售额估计达到 530 亿元，其中汽车再制造产业的年销售额是 365 亿元。现在有 6 000家企业进行打印机硒鼓的再制造，年销售额达到 30 亿美元。如今每年可再制造领域生产的新产品价值约为 1.4 万亿元，为实际再制造产品价值的 26 倍，再制造业未来发展潜力巨大。废旧零部件的利用，节约了企业原材料的投入，提高了产品的利润空间，如欧洲施乐公司 1995 年节约了原材料费用 6 940 万美元，1997 年再制造复印机需求量超过总生产量的 50%；美国的施乐公司再制造收益每年大约是 2.5 亿元。

其二是：再制造是一个劳动密集型产业，能够创造大量的就业机会，美国 1996 年统计再制造直接雇员是 48 万人，而销售额相同的情况下，美国钢铁产业的直接就业人员为 24.1 万人。再制造也是一个培训产业工人并促进就业的重要场所。一份对再制造公司的调查发现，每家公司 80%的培训计划和花在这些计划的平均年度支出超过 30 000 美元。

其三是：再制造减少了废旧产品的环保处理量和新品的生产量，减少了环境污染，避免了国家或公司处理固体废弃物所耗费的巨额开支。例如 1995 年欧洲施乐公司估计节约掩埋费用 20 万美元；美国因再利用每年节约环保处理费约 50 亿美元。在德国墨盒、汽车、冰箱的处理费用分别占直接生产费用的 2%、3%、12.5%。

其四是：由于再制造生产的起点是原产品的零部件，保存了大量原制造过程中注入的材料、能源、设备磨损、劳动力等附加值，而再制造产品一般能够直接再用原产品中 50% ~ 90%的零件，所以在保证性能与新品相当的情况下，再制造产品价格一般是新品的 40% ~ 70%。价廉物美的再制造产品可以极大地促进人们生活水平的提高。

再制造工程的迅速发展是可持续发展战略的必然要求，因其在产品中明显的后发优势及巨大的资源、环保、经济效益而得到了广泛的重视，也必将在更多的产品领域得到应用。

1.6　再制造加工工艺及费用分析

再制造工艺过程就是根据再制造技术条件对废旧产品进行加工，生成再制造产品的过程。再制造工艺过程一般不是指整个再制造全过程，一般不包括再制造中毛坯的逆向物流及再制造产品的销售，主要指再制造工厂内部的再制造工艺，包括拆解、清洗、检测、加工、零件测试、装配、整机测试、包装等步骤。由于再制造的产品种类、生产目的、生产组织形式的不同，与其相适应的工艺过程也不完全相同。图 9.4-2 所示是一般情况下再制造的工艺过程。

再制造工艺中还包括重要的信息流，例如对各步骤零件情况的统计，以为掌握不同类产品的再制造特点提供条件。



例如通过清洗后，检测统计到某类零件损坏率达到80%以上，则可以在对该类产品再制造中减少对该类零件的清洗，直接丢弃，也可以在拆解中在需要的情况下，对该类零件进行有损拆解，以保持其他零件的完好性。同时通过建立再制造产品整机的测试性能档案，可以为产品的售后服务提供保障。所以，再制造工艺的各个过程是相互联系的，不是孤立的。

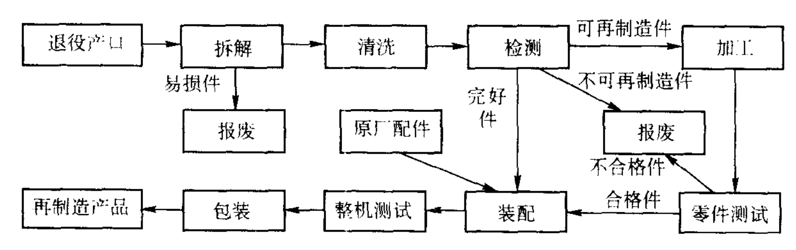


图 9.4-2　再制造工艺流程图

1.6.1　再制造各主要工艺步骤

1）拆解　废旧毛坯经外部清洗后，进入拆解工位。根据再制造的目的和再制造产品的性能要求不同，可以确定废旧毛坯拆解的深度和序列。一般情况下，需要将废旧产品全部拆解到子部件或零件水平。在拆解过程中，对于易损件，直接淘汰，对于损坏明显，并且根据经验不能再制造修复的件也要淘汰，避免进入清洗程序。淘汰的零件能够再循环的，要分类收集后运至再循环处理；不能再循环的，收集后进行环保处理，增加资源的利用率，减少对环境的污染。

毛坯拆解工作量比较大，直接影响到再制造质量和成本。从工作本身来看，并不需要很高的技术，也不需要复杂的设备。但如果不重视这项工作，一则容易在拆解中造成零件的变形和损伤，增加修复费用并影响产品质量，而且由于拆解是劳动密集型步骤，所需时间直接影响到生产的周期和费用。

2）清洗　清洗是借助于清洗设备将清洗液作用于工件表面，用一定的清洗方法除去工件表面的油脂污垢，并使工件表面达到一定的清洁度的过程。拆解后的零件根据形状、材料、类别、损坏情况等分类后采用相应的方法进行清洗。常用的清洗方法有擦洗、高压或常压喷洗、电解清洗、气相清洗、超声波清洗及多步清洗等方法。在再制造清洗步骤中要尽量减少清洗液对环境的危害，采用绿色清洗技术。

产品的清洁度是再制造产品的一项主要质量指标，清洁度不良不但会影响到产品的再制造加工，而且往往能够造成产品的性能下降，容易出现磨损过度，精度下降，寿命缩短等现象，影响产品的质量，同时良好的清洁度，也是提高消费者对再制造产品信心的主要外观表征。

3）检验及分类　检验是再制造过程的中保证产品质量的重要环节，既可以通过检验确定零件的状况，又能够根据零件的失效情况，确定拟采用的再制造加工方法，并进行分类。

由于再制造毛坯状况的个体性，不同于新品制造中毛坯质量的一致性，所以检验要求按照新品生产标准，对所有清洗后的零件进行。一般可以分为三类：可直接利用的、需要再制造加工的和报废淘汰的。可直接利用的是指其尺寸和性能均符合新品技术标准，可直接运送到装配程序使用的零件；需要再制造加工的是指对于不符合新品标准的，但能够进行再制造加工的零件，需要确定相应的加工方法，进入相应的工序；报废淘汰的是指不符合新品装配标准，而且又不可再制造或者没有再制造价值的零件，需要收集后运送到相应再循环程序。

零件的检验内容主要包括几何精度的检验、表面质量的检验、力学性能的检验、陷落缺陷的检验、质量与平衡的检验等，常用的方法包括感觉检验法、仪器工具检验法和物理检验法等。同时对零件的检验要及时收集数据，加强数据统计，提高分类及检验效率。

4）再制造加工　再制造加工包括对零部件的恢复和升级，主要指对失效的零件根据新品的要求，采用先进的工艺技术恢复到新品时的质量标准或者升级到超过新品的质量标准。再制造加工方法很多，主要包括恢复尺寸法、修理尺寸法、附加零件法、改造升级法等，例如可利用先进表面技术进行表面尺寸恢复，使表面性能优于原来零件，或者采用机械加工将相关零件加工到相应修理尺寸，恢复到正常配合性能，或者通过修改或增加零部件的部分结构，增强部分功能或者修改原产品的缺陷，提高产品的综合性能。

再制造加工技术包括表面工程技术、机械加工技术、激光修复技术等，不同工艺都有各自的特点和适用性，在确定合理的零件再制造加工方法时，主要从技术、经济、环保观点出发，考虑适用性、耐久性、技术经济性等原则。

对再制造加工后的零件也要进行测试，符合新品技术标准的可以用于装配程序，否则再加工或者报废处理。

5）装配　通过各个步骤的合格零部件运送到装配车间，对于淘汰的零件采用新品零件替换，然后进行装配，这是保证产品质量的最后步骤。要制订科学的装配工艺，在选择零件进行装配时要保证零件间的相对运动精度、相互位置精度及密封性、清洁度和调整要求等，同时要提高配合表面间的配合质量和接触质量。装配时一定要保证零件的干净，所有程序必须按要求进行，配合关系要适宜及装配中用力要合适等。

同时，在装配中，要按照新品装配标准，科学地做好零件间隙的调整和零件间相互位置的校正工作，做好相应的密封和润滑，以保证再制造产品最大性能的实现。

6）整机测试　整机测试是保证产品质量的必不可少的工序，主要任务是检查总装配的质量和进行相互联结的局部调整。整机测试可在室内或室外进行，可采用台架测试，测试方法和要求按新品标准执行。再制造要求对所有的再制造产品进行100%的检测。

7）包装　再制造产品的包装是保证消费者对再制造产品信心的重要内容。主要包括对产品本身的外观包装，例如对外裸件进行喷漆等，制订产品的说明书、质保书，标示环保产品标志，制订包装盒等。再制造产品的包装要突出环保理念，采用可回收的包装盒，使用无环保危害的喷涂工序等。包装完毕的产品，可以进入库存等待销售。

1.6.2　再制造费用分析

再制造产品的生产是从废旧产品的零部件开始的，相比新品制造过程省掉了零件本身的生产，所以能够保存产品第一次生产中所赋予的大部分价值，在保证产品质量不低于新品的情况下，费用比制造过程大大降低，平均约为新品的一半，但根据相应的产品种类不同而改变。再制造产品的售价一般为新品的40%～80%，为消费者提供了更多的产品选择



机会，对于再制造商和消费者是个双赢的结果。

对于不同类产品，如机械类产品和电子类产品来说，再制造工艺中的拆解、清洗、检测、加工、装配等5个主要步骤间的费用消耗差别较大。图9.4-3为各步骤的费用分布图。

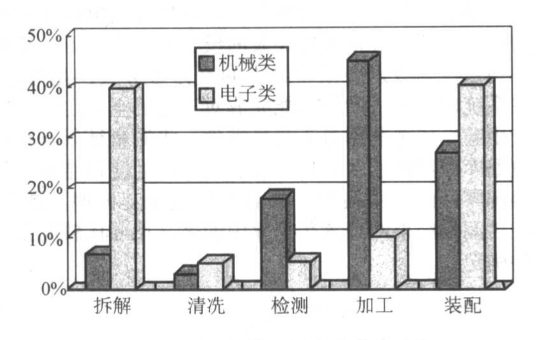


图9.4-3 再制造工艺步骤费用分布

通常，复杂的机械产品，如汽车变速器、发动机等，主要的费用集中于零件的再制造加工及替换的新零件费用，而电子类产品，只有很少的零件可以进行再制造加工，所以拆解和装配步骤的费用往往比较多。

再制造工序是一个复杂的过程，每一个步骤都需要一批高新技术和材料支撑。而且目前再制造中仍需要开发一批高新技术，如自动化拆解技术、环保高效清洗技术、纳米表面工程技术、柔性再制造技术、无损检测技术等，来进一步提高废旧毛坯利用率，加强产品质量控制，建立科学的再制造标准检测及生产体系，规范再制造生产工艺，以扩大再制造产品的种类和应用规模。

2 再制造工程的设计基础

针对失效的产品进行再制造，首先要对其进行再制造设计，以形成最优化的再制造工艺流程。再制造工程的设计基础以废旧产品的再制造性评价、剩余寿命评估、再制造产品建模等为核心研究内容。

2.1 废旧产品的再制造性评价

废旧产品的再制造性评价是决定其能否进行再制造的前提，是再制造基础理论研究中的首要问题。再制造性是指经技术、经济和环境等因素综合分析后，废旧产品所具有的通过维修或改造，恢复或超过原产品性能的能力。其目的是通过废旧产品的设计结构分析和再制造的技术经济分析，综合评价废旧的产品是否有再制造的价值。影响再制造性的因素错综复杂，可归纳如图9.4-4所示的几个方面。

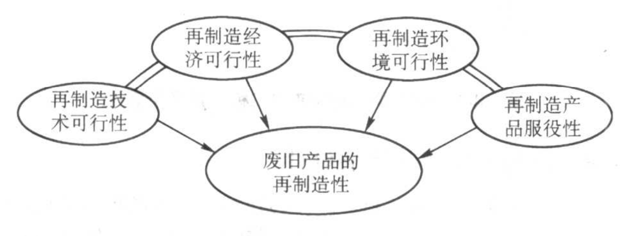


图9.4-4 再制造性及其影响因素

（1）再制造性的主要研究内容

1）废旧产品再制造的技术性评价　从产品的设计结构上分析可拆卸装配性、可再制造加工性、性能升级性及再制造后的服役性等，从再制造加工的难易及再制造后的服役性能方面来评价是否有再制造的价值。

2）废旧产品再制造的经济性评价　从技术经济的角度分析废旧产品再制造在经济上是否合算。尤其是要客观、准确地评估废旧产品在再制造每一个阶段的生产成本，分析其经济合理性，这对制定具体的再制造工艺、降低再制造成本，具有特别重要的意义。

3）废旧产品再制造的环境性评价　从废旧产品本身报废造成的环境污染、再制造过程中可能造成的环境污染、再制造产品在服役中可能造成的环境污染等方面综合考虑，从而评价废旧产品是否具有环保、节能、节材等社会意义。

4）研究建立废旧产品再制造性概念、评价体系、方法、评价模型及专家评价系统。

（2）再制造性的评价方法

由以上概念及相互关系可知，废旧产品的再制造特性评价是一个综合的系统工程，研究其评价体系及方法，建立再制造性评价模型，这是科学开展再制造工程的前提。不同种类的废旧产品其再制造性一般不同，即使同类型的废旧产品，因为产品的工作环境及用户不同，其导致废旧产品的方式也多种多样，如部分产品是自然损耗达到了使用寿命而报废，部分产品是因为特殊原因（如火灾、地震及偶然原因）而导致报废，部分产品是因为技术、环境或者拥有者的经济原因而导致报废，不同的报废原因导致了同类产品具有不同的再制造性值。

对再制造性值的判断，可以通过采集大量影响产品再制造的技术性、经济性、环境性和服役性等信息，构建包括非线性多影响因素的数据集；利用模糊数学和数理统计方法，对模糊因素进行分析量化；通过定性和定量相结合、模糊评判、综合权衡等方法，确定废旧产品再制造的经济、技术、环境的评价指标及权衡因子，建立较为完善的再制造性评价模型。废旧产品的再制造性评价流程，可以采取如图9.4-5所示的流程。

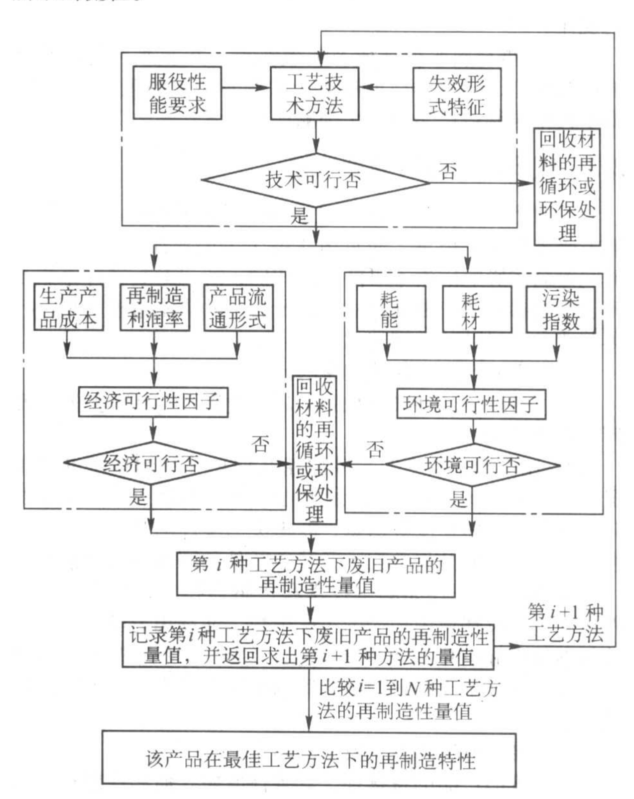


图9.4-5 废旧产品再制造特性评价流程

2.2 废旧产品的失效机理和寿命评估

产品服役的环境行为及失效机理研究是进行废旧产品的



剩余寿命评估和再制造产品寿命预测的基础理论依据。产品剩余寿命评估方法主要建立在零部件失效分析的基础上，应用断裂力学、摩擦学、腐蚀学、金属物理等理论建立失效行为的数学模型，从宏观和微观上研究零部件在复杂的环境中失效的机理和损伤的规律，并与加速实验的结果相结合，以建立产品（尤其是再制造产品）寿命的预测评价系统，准确地估算废旧产品的剩余寿命、再制造产品的使用寿命及已使用产品的剩余寿命，制定合理的再制造方案，提高产品的使用寿命。其主要研究内容如下。

1）进行腐蚀与损伤动力学过程的模拟，建立自然环境中多因素非线性耦合作用下零部件失效行为的数学模型和寿命预测模型。

2）建立装备零部件失效实车考核数据库系统，并研究实车考核数据与模拟自然环境加速实验结果的关系，对寿命预测模型进行评价。

3）应用断裂力学理论分析疲劳裂纹扩展规律，研究裂纹尖端的微观结构及力学行为；研究断裂过程和形貌特征与零部件材料的显微组织性能、结构、涂层体系、受力状态及环境条件之间的关系，揭示断裂失效的规律以评估剩余寿命。

4）应用金属物理理论，从零部件材料的显微组织、微细观缺陷上研究零部件材料的失效行为，并指导零部件的寿命预测。

5）从宏观和微观上研究零部件在复杂的环境中失效的机理和损伤的规律。主要研究复杂环境中多因素非线性耦合作用下的零部件失效机理：包括腐蚀介质与力学因素联合作用下的零件损伤机理，温度场与应力场耦合作用下的零部件损伤行为，多轴载荷作用下零部件的疲劳破坏行为，以及气/液/固多相流环境中零部件的腐蚀、冲蚀、穴蚀交互作用损伤规律。

6）根据材料服役环境及失效特点，并参照再制造产品的性能模型，研究典型再制造产品的寿命预测理论与方法，提出典型再制造产品的寿命预测评价技术。

2.3　废旧产品的再制造建模

废旧产品零件本身蕴含了大量的几何形貌、摩擦学性能、整体强度等信息。而且由于各个废旧产品的工作环境、时间等众多影响因素不可能完全相同，所以对其零件原始几何、性能参量的获取并建立几何及力学的再制造模型是进行再制造产品设计的关键技术和难点。

（1）废旧产品再制造建模的研究内容

1）研究废旧零件的机械学、摩擦学行为及所丧失的几何及性能参量。

2）在不能获取废旧零件原始几何尺寸和测量基准的情况下，采取接触式和非接触式测量技术，挖掘废旧产品中的几何形貌、整体强度等信息，获得废旧零件的几何参量，反求出产品的原始几何数据，并建立零件的再制造几何模型。

3）通过现代性能测试技术和传感器技术，获取废旧零件再制造服役环境中相关的工况参数，并利用力学、运动学的基本理论和有限元计算等手段，结合环境分析和失效分析，探讨建立基于知识的信息库的原始零件力学和表面性能模型。

（2）再制造逆向加工模型的建立

鉴于废旧产品的特殊性，其零件原始几何和性能参量的获取是恢复零件至原尺寸的前提。当再制造生产由原产品制造商进行时，生产商拥有独特的原产品数据库，可以从中提取原始零件的几何及性能模型，通过与当前识别后获取的缺损零件几何模型的对比，可以生成零件的待加工模型。根据加工模型，通过控制加工方式，可以将零件恢复至原几何尺寸状态，保持产品的完好性。

例如，磨损机械零件自动堆焊模型的形成，主要包括以下几个步骤：固定零件；识别磨损零件；测量零件磨损量；分析测量数据并生成堆焊模型。在此步骤中，是以磨损零件外表面可能存在的一些在使用中留下的没有磨损的点作为对工作区零件进行空间定位的参考点，此情况能够保证零件修复后的精度；如果磨损零件外表面没有这些参考点，那么零件的空间定位则应以磨损量最少的点为参考点，此情况下，只有在系统软件的协助下才能完成对工件的空间定位。定位后，应用激光传感器测量头测量零件，将测量结果与存储在系统数据库中零件的名义尺寸或者对新品的测量结果进行比较，得到零件的缺损模型，进而可生成加工模型。图9.4-6是将工件测量结果同系统数据库中的名义尺寸比较时工件磨损层的确定。

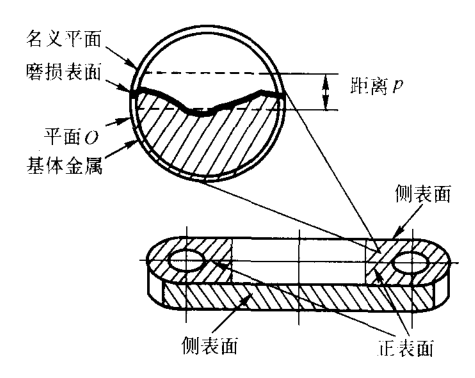


图9.4-6　确定零件正表面平面O与N的方法

另外，在因技术封锁或者原零件的几何尺寸模型丢失的情况下，进行再制造加工首先需要求出原零件的原始几何尺寸模型，即在不能获取废旧零件原始几何尺寸和测量基准的情况下，研究废旧零件的机械学、摩擦学等行为及所丧失的零件信息，并通过采取接触式和非接触式测量技术，挖掘蕴含在废旧产品中的几何形貌、整体强度等信息，利用反求方法获得零件设计时的几何形貌和整体强度，得出产品的原始几何模型及性能模型；然后再通过与当前缺损模型的对比，同时对服役条件分析及表面性能检测，研究获得再制造零件摩擦学等表面性能和力学性能的再制造加工模型。其原理如图9.4-7所示。

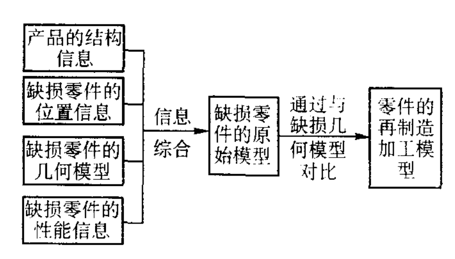


图9.4-7　缺损零件再制造加工模型反求示意图

2.4　面向再制造的产品设计

为了确保产品的再制造性，必须制订完整的再制造性计划，从产品的设计、研制、制造、装配、使用、再制造至报废，所有阶段都应当有可靠的再制造性保证措施。但根据美国专家分析，产品再制造性的2/3是在产品设计阶段确定的。因此，设计正确并确保设计阶段的再制造性是最重要的一环。

（1）设计中的再制造性主要内容

1）再制造性指标及其量值的确定　所有的产品都具有一定的再制造性，产品的再制造性的高低是由其再制造性指

标来衡量的。再制造性指标过低的产品不具备再制造价值，但过高又易于过量增加成本，所以产品再制造性指标的选择必须根据产品的设计和使用要求，其量值大小也要合理选择。再制造性指标是整个再制造性工程所要达到的目标，正确地选择产品的再制造性指标及其量值，将为产品的再制造性工作奠定良好的基础。产品的设计决定了产品的固有再制造性，但还有待进一步研究确定衡量产品再制造性的指标。

确定指标的量值是决定产品再制造性实现的重要标志，一般可以参照同类产品的再制造性指标来确定，或者由产品的再制造性分析模型和再制造性预测方法来预测产品的再制造性指标值，再由预测值来确定再制造性的量值，也必须考虑技术、环境、工艺等因素的影响和需要，决定产品再制造性指标的量值。

2）再制造性预测　再制造性预测是根据产品各部分的结构及各零件的再制造性，估计、测算出产品的再制造性。再制造性预测的目的是：协调设计参数及指标，提高产品的再制造性；对比产品设计方案，以选择最佳形式；预示再制造性薄弱环节，以采取改进措施。再制造性预测是再制造性设计的重要内容，包括零件的再制造性预测和产品的再制造性预测。

零件再制造性预测主要是指根据组成产品的各零件的不同故障模式的概率，预测零件的再制造性，并确定其再制造工艺。

产品再制造性预测是指根据不同零件的再制造性与组成产品的零部件数量、零部件的失效模式以及零部件之间装配方法、相互关系等，预测产品的再制造性，并确定其整体的再制造工艺。产品整体再制造性预测方法还需要进行深入的研究。

3）再制造性分配　再制造性分配是指将设计任务书上规定的产品再制造性指标，合理地分配到产品各子单元及零件的一种设计方法。再制造性分配是一个从大到小、由上到下的分解过程，其主要目的是分配给各级部件再制造性指标，作为产品设计中各单元的一个重要参数，使各部分设计人员明确其再制造性设计要求，并研究实现这些要求的可能性及办法。它也是再制造性实验试验与评估的依据。

4）再制造性试验　为了提高或者保证产品的再制造性，需要在产品使用后在相应情况下进行再制造试验，以确定产品在一定条件下的再制造。再制造性试验的目的是保证产品在规定的使用条件下能够达到规定的再制造性。再制造性试验是取得再制造性指标数据的有效手段，可以发现产品设计和研制阶段的问题，明确是否需要修改设计以提高产品的再制造性。同时，再制造性试验也是对改进后的再制造性指标进行评定和验证，一般应包括实验室再制造性试验和现场再制造性试验两种。

5）故障树分析　一般来讲，零件如果没有失效，并且剩余寿命大于产品使用周期时，可确定该零件的再制造性为100%；如果失效，则目前的磨损、腐蚀等形式一般可以通过技术进行再制造，具有较好的再制造性，发生不可修复故障零件的再制造性则可以确定为零。通过分析产品可能和潜在的失效模式，确定故障的相对严重程度和发生概率，以及产品在再制造中发现故障的可能性，对不同的零部件的故障模式进行预测，可以确定产品的哪些零件可能直接重用，哪些零件可能再制造后重用，以及不同零件重用的概率，从而确定产品在不同情况下的再制造性。所以，对产品的进行故障树分析，是确定产品再制造性的重要方法，并且通过故障树分析，选用故障率低的零部件，可以改进提高产品的再制造性。

（2）产品设计中再制造性的定性分析

对产品再制造性要求包括定量和定性两方面。目前对新品再制造性设计的研究还只是处在定性分析阶段，尚没有形成科学的再制造性设计体系。根据目前定性研究情况，参照再制造全过程中各步骤的要求，再制造性设计主要应考虑以下几个方面。

1）易于运输性　废旧产品由用户到再制造厂的逆向物流是再制造的主要步骤，直接为再制造提供了不同品质的原料，而且产品逆向物流费用一般占再制造总体费用比率较大，对再制造具有至关重要的影响。产品设计过程必须考虑末端产品的运输性，使得产品更经济、安全地运输到再制造工厂。例如对于大的产品，在装卸时需要使用叉式升运机的，要设计出足够的底部支撑面；尽量减少产品突出部分，以避免在运输中碰坏，并可以节约贮存的空间。

2）易于拆解性　拆解是再制造的必须步骤，也是再制造过程中劳动最为密集型的过程，对再制造的经济性影响较大。再制造的拆解要求能够尽可能保证产品零件的完整性，并要求减少产品接头的数量和类型，减少产品的拆解深度，避免使用永固性的接头，考虑接头的拆解时间和效率等。在产品中使用卡式接头、模块化零件、插入式接头等均有易于拆解、减少装配和拆解的时间，但也容易造成拆解中对零件的损坏，增加再制造费用。因此在进行易于拆解的产品设计时，对产品的再制造性影响要进行综合地考虑。

3）易于分类性　易于分类的零件也可以明显的降低再制造总体时间，并提高再制造产品的质量。为了使拆解后的零件易于分类，设计时要采用标准化的零件，尽量减少零件的种类，并对相似的零件设计时应该进行标记，增加零件的类别特征，以减少零件分类时间。

4）易于清洗性　清洗是保证产品再制造质量和经济性的重要环节。目前存在的清洗方法包括超声波清洗法、水或溶剂清洗法等。可达性是决定清洗难易程度的关键，设计时应该使外面的部件具有易清洗且适合清洗的表面特征，例如采用平整表面，采用合适的表面材料和涂料，减少表面在清洗过程中的损伤概率等。

5）易于修复（升级）性　对原制造产品的修复和升级是再制造过程中的重要组成部分，可以提高产品质量，并能够使之具有更强的市场竞争力。因为再制造主要依赖于零部件的再利用，设计时要增加零部件的可靠性，减少材料和结构的不可恢复失效，防止零部件的磨损和腐蚀；要采用易于替换的标准化零部件和可以改造的结构，并预留模块接口，增加升级性；要采用模块化设计，通过模块替换或者增加模块而升级再制造产品。

6）易于装配性　将再制造零部件装配成再制造产品是保证再制造产品质量的最后环节，对再制造周期也有明显的影响。采用模块化设计和零部件的标准化设计明显有利于装配的进行。据估计，再制造设计中如果拆解时间能够减少10%，通常装配时间则可以减少5%。另外，再制造中的产品应该尽可能允许多次拆解和再装配，所以设计时应考虑产品具有较高的连接质量。

新品的设计是一个综合、并行的过程，需要综合分析功能、经济、环境、材料等多种因素，必须将产品末端时的再制造性作为产品设计的一部分，进行系统考虑，保证产品寿命末端的再制造能力，以实现产品的最优化回收。

3 焊接结构再制造延寿的关键技术

3.1 热喷涂技术

热喷涂技术是近年来在机械制造和设备维修中广泛应用的一项表面工程技术。机械零件大多数是用金属材料制造的，在使用中由于配合零件表面的相互作用会引起磨损；零

件的金属表面由于大气的影响会发生化学和电化学的作用而导致腐蚀。有时两种现象同时发生，称为磨蚀。随着现代工业和科学技术的发展，机械零件经常处于异常复杂和苛刻的条件下工作，大量机械设备往往因磨损、腐蚀而报废。

(1) 基本概念

热喷涂是指将熔融状态的喷涂材料，通过高速气流使其雾化喷射在零件表面上，形成喷涂层的一种金属表面加工方法。

根据热源来分，热喷涂有四种基本方法：火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂和特种喷涂。火焰喷涂就是以气体火焰为热源的热喷涂。目前，火焰喷涂按火焰喷射速度分为火焰喷涂、气体爆燃式喷涂（爆炸喷涂）及超音速火焰喷涂三种。电弧喷涂是以电弧为热源的热喷涂。等离子喷涂是以等离子弧为热源的热喷涂。

以气体火焰为热源，将喷涂材料（自熔剂合金粉末）通过特殊工艺方法重熔喷涂涂层的方法称为喷熔。喷熔过程的特点是先在基材表面上喷上涂层，然后利用高于涂层熔点（但低于基材熔点）镀使涂层熔融，以使其与基材表面形成具有钎焊接头特点的结合。喷熔的结合强度高，因而喷熔工艺可以应用于抗疲劳、抗冲击的机械零件。

(2) 热喷涂技术的应用

热喷涂技术在应用上已由制备装饰性涂层发展为制备各种功能性涂层，如耐磨、抗氧化、隔热、导电、绝缘、减摩、润滑、防辐射等涂层，热喷涂着眼于改善表面的材质这比起整体提高材质无疑要经济得多。热喷涂既可用于修复，又可用于制造。由于涂层材料优异，用其修复零件的寿命不仅达到了新产品的寿命，而且对产品质量还起到了改善作用，因此在新产品设计时就应考虑到应用热喷涂这一表面工程技术。表 9.4-1、表 9.4-2 分别列出了热喷涂工艺的特点及热喷涂与其他方法的比较。

表 9.4-1 热喷涂工艺特点

工艺方法	等离子喷涂法	火焰喷涂法	电弧喷涂法	气体爆燃式喷涂法
冲击速度/m·s⁻¹	400	150	200	1 500
温度值/℃	12 000	3 000	5 000	4 000
典型涂层孔隙串/%	1 ~ 10	10 ~ 15	10 ~ 15	1 ~ 2
典型涂层结合强度	30 ~ 70	5 ~ 10	10 ~ 20	80 ~ 100
优点	孔隙率低，结合性好，多用途，基材温度低，污染低	设备简单，工艺灵活	成本低，效率高，污染低，基材温度低	孔隙率非常低，结合性极佳，基材温度低
限制	成本较高	通常孔隙率高，结合性差，对工件要加热	只应用于导电喷涂材料，通常孔隙率较高	成本高，效率低

表 9.4-2 常用表面技术的比较

工艺方法	热喷涂法	焊接法	电镀法
尺寸	手工操作时无限制，否则受装置的限制	无限制	受电镀槽尺寸的限制
几何形状	通常只适用于简单形状	对小孔有困难	范围很广
零件的材料	几乎不受限制	金属	导电物
表面材料	几乎不受限制	金属	金属、简单合金
厚度/mm	1 ~ 25	≤25	≤1
孔隙率	1% ~ 15%	通常无	通常无
结合强度	一般	高	良好
热输入	低	通常很高	无
预处理	喷砂	机械清洁	化学清洁和刻蚀
后处理	通常不需要	消除应力	消除应力和脆性
公差	相当好	差	良好
可达到的表面光洁度	相当好	一般	极佳
沉积率/（kg/h）	1 ~ 30	1 ~ 70	0.25 ~ 0.5

3.2 电刷镀技术

电刷镀技术是电镀技术的新发展，是表面工程的重要组成内容，是国家“六五”到“九五”计划期间，连续列为国家重点推广的新技术项目。它具有设备轻便、工艺灵活、镀积速度快、镀层种类多、结合强度高、适应范围广、对环境污染小、省水省电等一系列优点，是机械零件修复和强化的有效手段，尤其适用于大型机械零件的不解体现场修理或野外抢修。

(1) 电刷镀技术的基本原理

电刷镀技术采用一专用的直流电源设备（如图 9.4-8 所示），电源的正极接镀笔作为刷镀时的阳极，电源的负极接工件，作为刷镀时的阴极。镀笔通常采用高纯细石墨块作阳极材料，石墨块外面包裹上棉花和耐磨的涤棉套。刷镀时使浸满镀液的镀笔以一定的相对运动速度在工件表面上移动，并保持适当的压力。这样在镀笔与工件接触的那些部位，镀液中的金属离子在电场力的作用下扩散到工件表面，并在工件表面获得电子被还原成金属原子，这些金属原子沉积结晶就形成了镀层。随着刷镀时间的增长镀层增厚。

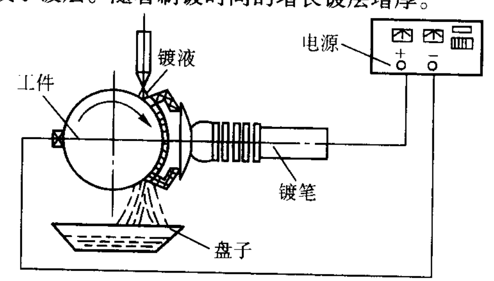


图 9.4-8 电刷镀基本原理示意图



电刷镀技术的基本原理可以用下式表示：

$$M^{n+} + ne \Rightarrow M$$

式中，M^{n+} 为金属正离子；n 为该金属的化合价数；e 为电子；M 为金属原子。

(2) 电刷镀技术的特点

电刷镀技术的基本原理与槽镀相同，但它却有着区别于槽镀的许多特点。正是这些特点带来了电刷镀技术的一系列优点，其主要特点，可以从三个方面叙述。

1) 设备特点

① 电刷镀设备多为便携式或可移动式，体积小、质量轻，便于拿到现场使用或进行野外抢修。

② 不需要镀槽，也不需要挂具，设备数量大大减少，占用场地少，设备对场地设施的要求大大降低。

③ 一套设备可以完成多种镀层的刷镀。

④ 镀笔（阳极）材料主要采用高纯细石墨，是不溶性阳极。石墨的形状可根据需要制成各种样式，以适应被镀工件表面形状为宜。刷镀某些镀液时，也可以采用金属材料作阳极。

⑤ 设备的用电量、用水量比槽镀少得多，可以节约能源、资源。

2) 镀液特点

① 电刷镀溶液大多数是金属有机络合物水溶液，络合物在水中有相当大的溶解度，并且有很好的稳定性。因而镀液中金属离子含量通常比槽镀高几倍到几十倍。

② 不同镀液有不同的颜色，透明清晰，没有浑浊或沉淀现象，便于鉴别。

③ 性能稳定，能在较宽的电流密度和温度范围内使用，使用过程中不必调整金属离子浓度。

④ 不燃、不爆、无毒性，大多数镀液接近中性，腐蚀性小，因而能保证手工操作的安全，也便于运输和储存。除金、银等个别镀液外均不采用有毒的络合剂和添加剂。现在无氰金镀液已研制出来。

⑤ 镀液固化技术和固体制剂的研制成功，给镀液的运输、保管带来了极大的方便。

3) 工艺特点　电刷镀区别于电镀（槽镀）的最大工艺特点是镀笔与工件必须保持一定的相对运动速度。正是由于这一特点，带来了电刷镀的一列优点。

由于镀笔与工件有相对运动，散热条件好，在使用大电流密度刷镀时，不易使工件过热。其镀层的形成是一个断续结晶过程，镀液中的金属离子只是在镀笔与工件接触的那些部位放电还原结晶。镀笔的移动限制了晶粒的长大和排列，因而镀层中存在大量的超细晶粒和高密度的位错，这是镀层强化的重要原因镀液能随镀笔及时供送到工件表面，大大缩短了金属离子扩散过程，不易产生金属离子贫乏现象。加上镀液中金属离子含量很高，允许使用比槽镀大得多的电流密度，因而镀层的沉积速度快。

使用手工操作，方便灵活，尤其对于复杂型面，凡是镀笔能触及到的地方均可镀上。非常适用于大设备的不解体现场修理。

(3) 电刷镀技术的应用范围

1) 恢复磨损零件的尺寸精度与几何精度　在工业领域中，因机械设备零部件磨损造成的经济损失是十分巨大的，用电刷镀恢复磨损零件的尺寸精度和几何精度是行之有效的方法。

2) 填补零件表面的划伤沟槽、压坑　零件表面的划伤沟槽、压坑，是运行的机械设备经常出现的损坏现象。尤其在机床导轨，压缩机的缸体、活塞，液压设备的油缸、柱塞等零件上最为多见。用刷镀或刷镀加其他工艺修补沟槽、压坑是一种既快又好的方法。

3) 补救加工超差产品　生产中加工超差的产品，一般说来超差尺寸都很小，非常适合用电刷镀修复，使工厂成品率大大提高。

4) 强化零件表面　用电刷镀技术不但可以修复磨损零件的尺寸，而且可以起到强化零件表面的作用。例如在模具型腔表面刷镀 0.01～0.02 mm 的非晶态镀层，可以使寿命延长 20%～100%。

5) 提高零件表面导电性　在电解槽汇流铜排接头部位镀银，可减小电阻，降低温升，使用效果良好。

为了提高大型计算机的工作可靠性，在电路接点处电刷镀金处理，既能保证接点处有很小的接触电阻，又能防止接点处金属氧化造成的断路。

6) 提高零件的耐高温性能　钴－镍－磷－铌非晶态镀层的晶化温度可达 320℃，在 400～500℃高温下，镀层由非晶态向晶态转变后，同时析出第二相组织，这些第二相组织是弥散分布在镀层中的硬质点，有效提高了镀层耐高温磨损的性能。

7) 改善零件表面的钎焊性　把一些难钎焊材料硬要用钎焊的方法连接在一起，是十分困难的。而在这些难钎焊的材料表面上刷镀某些镀层后，钎焊将变得非常容易，而且有较高的结合强度。

8) 减小零件表面的摩擦系数　当需要零件表面具有良好的减摩性时，可选用铟、锡、铟锡合金、巴氏合金等镀层。试验证明，在滑动摩擦表面或齿轮啮合表面上刷镀 0.6～0.8 gm 的铟镀层时，不仅可以降低摩擦副的摩擦系数，而且可以有效地防止高负荷时产生的黏着磨损，具有良好的减摩性能。

利用复合刷镀方法，在镍镀液中加入二硫化钼、石墨等微粉，也可减小镀层的摩擦系数，并起到自润滑作用。

9) 提高零件表面的防腐性　当要求零件具有良好的防腐性时，可根据防腐要求和零件工作条件选择镀层。所谓阴极性镀层有金、银、镍、铬等。所谓阳极性镀层有锌、镉等。

10) 装饰零件表面　电刷镀层也可以作为装饰性镀层来提高零件表面的光亮度或工艺性。如在金属制品、首饰上镀金、镀银层会使这些制品更为珍贵。在一些金属、非金属制品上还可以进行仿古刷镀，如在秦兵马俑上刷镀仿青铜色。

3.3　表面粘涂技术

(1) 概述

粘接是一项古老而又实用的新技术。表面粘涂技术是指以高分子聚合物与特殊填料（如石墨、二硫化钼、金属粉末、陶瓷粉末和纤维）组成的复合材料胶黏剂涂敷于零件表面实现特定用途（如耐磨、抗蚀、绝缘、导电、保温、防辐射及其复合等）的一种表面工程技术。

近几十年来，随着粘涂剂不断出现，表面粘涂技术也得到较大发展。德国研制的爱司凯西（SKC）及钻石（DIAMANT）两大系列冷粘耐磨涂层较早应用于机床制造业中。如应用于重型龙门铣床的工作台导轨、横梁导轨、液压活塞等部件上使用效果很好。其他国家的产品，如瑞士的麦卡太克（MeCaTec）10 号和 12 号用于修复严重冲蚀磨损的水轮机叶片。美国贝尔佐纳系列产品用于石油化工、造纸、机械等行业。我国广州机床研究所研制的 HNT 环氧耐磨涂层材料是国内较早研制出的产品，用于机床导轨或其他摩擦面；襄樊市胶粘技术研究所研制的 AR-4、AR-5，装甲兵工程学院研制的 TG 系列超金属修补剂都广泛地应用于机械零部件耐磨损和耐腐蚀修复及预保护处理等领域，收到了很好的使用效果。

表面粘涂技术工艺简单，不会使零件产生热影响区和变



形，可以用来修补有爆炸危险（如井下设备、贮油、贮气管道）的失效零件。它安全可靠，又无需专门设备。现场作业，维修周期短，节省工时，在不停产条件下能进行修复，有效地提高了生产率，的确是一种快速价廉的维修技术，有着十分广泛的应用前景。

由于胶黏剂性能的局限性，目前该表面工程技术的应用受到下述一些限制。

1）表面粘涂层在湿热、冷热交变、冲击条件下，以及其他复杂环境条件下的工作寿命是有限的。

2）有机胶黏剂构成的表面粘涂层耐温性不高，一般不超过350℃。无机胶黏剂可耐1 000℃高温，陶瓷胶黏剂耐温达2 000℃以上，但较脆。

3）表面涂层有较高的抗拉、剪切强度，但抗剥离强度较低。

4）使用有机胶黏剂，尤其是溶剂型胶黏剂存在易燃、有毒等安全问题。

（2）表面粘涂技术的工艺

表面粘涂工艺分为下述步骤。

1）初清洗　初清洗主要是除掉待修复表面的油污、锈迹以便测量、制定粘涂修复工艺和预加工。零件的初清洗可在汽油、柴油或煤油中粗洗，最后用丙酮清洗。

2）预加工　为了保证零件的修复表面有一定厚度的涂层，在涂胶前必须对零件进行机械加工，零件的待修表面的预加工厚度一般为0.5～3 mm。为了有效地防止涂层边缘损伤，待粘涂面加工时，两侧应该留1～2 mm宽的边。为了增强涂层与基体的结合强度，被粘涂面应加工成“锯齿形”，带有齿形的粗糙表面可以增加粘涂面积，提高粘涂强度。

3）最后清洗及活化处理　最后清洗可用丙酮清洗；有条件时可以对粘涂表面喷砂，进行粗化活化处理，彻底清除表面氧化层；也可进行火焰处理、化学处理等，以提高粘涂表面活性。

4）配胶　粘涂层材料通常由A、B两组分组成。为了获得最佳效果，必须按比例配制。粘涂材料在完全搅拌均匀之后，应立即使用。

5）粘涂涂层　涂层的施工有刮涂法、刷涂压印法、模具成形法等。

6）固化　涂层的固化反应速度与环境温度有关，温度高，固化快。一般涂层室温固化需24 h，达到最高性能需7天，若加温80℃固化，只需2～3 h。

7）修整、清理或后加工　对于不需后续加工的涂层，可用锯片、锉刀等修整零件边缘多余的粘涂料。涂层表面若有大于1 mm的气孔时，先用丙酮清洗干净，再用胶修补，固化后研干。

对于需要后续加工的涂层，可用车削或磨削的方法进行加工，以达到修复尺寸和精度。

（3）表面粘涂技术的应用

粘涂技术在设备维修领域中应用十分广泛，不仅用于密封、堵漏、绝缘、导电，还广泛应用于修补零件上的多种缺陷，如裂纹、划伤、尺寸超差、铸造缺陷等。

表面粘涂技术在设备维修领域的主要应用如下。

1）铸造缺陷的修补　铸造缺陷（气孔、缩孔）一直是耗费资金的大问题。修复不合格铸件常规方法需要熟练工人，耗费时间，并消耗大量材料；采用表面粘涂技术修补铸造缺陷简便易行，省时省工且效果良好，修补后的颜色可保持与铸铁、铸钢、铸铝、铸铜一致。

例如，天津塘沽阀门厂生产的一大批大型阀门（内径约1.6 m），内圈加工后发现有大量气孔，采用TG919导电胶填补气孔，再在表面刷镀镍，不仅达到了密封的目的，而且表面美观。

2）零件磨损及尺寸超差的修复　零件磨损后，采用耐磨修补胶直接涂敷于磨损的表面，然后采用机械加工或打磨，使零件尺寸恢复到设计要求，该方法与传统的堆焊、热喷涂、电镀、电刷镀方法相比，具有可修复对温度敏感性强的金属零部件的优势和修复层厚度可调性的特点。

此外，还可进行零件划伤的修补、零件的防腐、零件密封堵漏等。表面粘涂技术越来越受到人们的重视，它必将在我国设备维修改造中发挥重大作用。

3.4 堆焊技术

利用焊接方法赋予机械零件表面以特殊的防腐、耐磨性能是堆焊技术的主要研究内容。堆焊最初的目的是对已损坏的零件进行修复，使其恢复尺寸，并使表面性能得到一定程度的加强。堆焊技术发展到现在，不仅在维修行业中大显身手，而是越来越多地将触角伸进制造业的领域，形成了焊接技术研究的一个重要分支。例如，在制造某些耐磨零件的时候，不能全部用高硬度的耐磨材料整体制造这些零件。因为，其一，高硬度的耐磨材料往往含有较多的贵金属，整体使用这些材料势必大大提高制造成本；其二，高硬材料大多较脆，整体使用满足不了韧性方面的要求，容易断裂；其三，高硬材料难于加工，整体制造在工艺上有困难。鉴于这种情况，如果用普通材料制造基体，然后在表面上堆焊一层耐磨合金，则既可以满足强度要求，又可以获得满意的耐磨性能。在工艺上降低了产品的加工难度，在经济上降低了成本，提高了产品的竞争力，真可谓一箭多雕。

研究工作者和工程技术人员在堆焊领域里做了大量的工作，从设计形形色色在不同工况下工作的堆焊材料，到制造种类繁多的堆焊设备，都在不断取得进展。

手工电弧堆焊是应用最广泛的一种堆焊方法。随着焊接材料的发展和工艺方法的改进，应用范围更加广泛。例如：加入铁粉的焊条可使生产率显著提高；采用酸性药皮的焊条可以大大改善堆焊工艺性能，降低粉尘含量，有利于改善焊工的工作条件；应用碳极手工电弧熔化自熔性合金粉末，可获得熔深浅、表面光整、性能优异的堆焊层。

振动电弧堆焊在汽车、拖拉机的旧件修复中已得到全面推广，经济效益也很显著。应用二氧化碳、水蒸气及熔剂层下保护的振动电弧堆焊工艺，可使堆焊层的质量和性能得到进一步提高。

宽带极堆焊是一种生产率极高的堆焊方法。利用已成形的合金带，可以在达300 mm的宽度上一次堆焊成形。且熔深浅，合金元素损失少，效率高，特别适用于对大面积的平整表面进行表面改性。

高频感应堆焊具有操作简便、熔深浅和生产效率高等优点，已成功地应用于堆焊农机犁铧。

氧－乙炔火焰堆焊的特点是火焰温度低，堆焊后可保持复合材料中硬质合金的原有形貌和性能，是目前应用较为广泛的抗磨堆焊工艺。用于堆焊高炉料中零件，可使寿命提高3～8倍。

4 焊接结构再制造延寿技术应用实例

4.1 电弧喷涂技术在海洋船只钢板防腐延寿中的应用

海洋船只钢结构防腐一般采用传统的有机涂层防护体系，具有一次性成本低、施工方便等优点。但有机涂层存在着与钢基体结合强度差、不耐磨损、易老化等缺点，防护寿命较短，一般为2～3年。而采用热喷涂金属涂层加有机涂料涂层形成的复合涂层对钢结构进行复合防护，根据国外研究报道和我们自己的研究成果，可使防护寿命达15～20年甚至更长。从长远来看，其成本也比有机涂层便宜，电弧喷



涂在热喷涂中具有生产效率高、成本低、涂层质量好等优点，是近些年来得到广泛重视并得到迅速发展的一项热喷涂技术。因此，采用电弧喷涂金属涂层加有机涂层形成的复合涂层对钢结构船体进行复合防护是一种较为理想的腐蚀防护体系。

钢结构船体的腐蚀历来是维修中一项难以解决的问题，尤其是在南海地区高温，高湿、高盐雾的使用环境中，舰艇钢结构的腐蚀更显严重。如果采用有机涂层隔离覆盖防腐加锌块阳极保护防腐，对船体有效保护期只有二年。因此，迫切需要一种能对钢结构进行长期有效保护的防腐措施。对钢结构进行喷锌、铝及锌铝合金防腐其有效防腐期在海洋腐蚀环境中可达 16 ~ 20 年，如再进行封孔处理，其有效防腐期将达 30 ~ 40 年。电弧喷涂技术具有涂层结合力强、孔隙率低、生产率高、生产成本低和节省能源等特点，特别适合大面积钢结构的腐蚀治理。

1993 年进行了电弧喷涂海洋船只钢板防腐实船考核试验试工，经施工后十个月内两次对该船电弧喷涂试验涂层的专门检查发现，已实施电弧喷涂的部位未见任何锈迹，而未经电弧喷涂的部位已出现锈蚀，这初步证明了电弧喷涂优良的再制造延寿效果。

电弧喷涂船体钢板防腐涂层施工工艺如下。

电弧喷涂钢结构防腐涂层施工工艺包括基体表面预处理，全属涂层制备和涂层后处理三道工序。本工艺规范参照国际标准 ISO 2063—91，日本标准 JISB6614—89，德国工业标准 DIN 8565—77，英国标准 BS2500/1—64（83），美国军用标准 MIL - STD - 1687 和我国标准 GD 9795 - 88，GB 11373—89 等标准制定。

（1）基体表面预处理

基体表面顶处理有如下三个作用：净化表面：去除妨碍涂层与基体结合的油污、锈蚀、旧漆及其他污染；粗化表面：增强表面粗糙度、提供表面微坑；活化表面；露出新鲜金属，增强表面活性。这三个作用的目的都是为了提高涂层与基体的结合强度。

1）净化表面　净化表面包括除油、脱漆，除锈。

① 主要除油方法

a）擦洗法　采用汽油、三氯乙烯、丙酮等有机溶剂或氢氧化钠、磷酸三钠、碳酸钠等碱性清洗剂对工件表面进行擦洗，可有效去除表面油污。这种方法主要适用于小型工件。为节约有机溶剂可先用水基清洗剂清洗。

b）高压射流清洗法　对于大型工件成钢结构，可采用清水或水基清洗剂，用高压射流对工件表面进行喷射清洗。

c）加热法　对于被油脂浸透了的多孔隙（如铸铁）工件，应采用加热法将渗入孔中的油脂驱除。为不影响工件金属的组织性能，工件的受热温度应低于 300℃。对于小型工件可采用箱式炉烘烤，对于大型工件可采用喷灯或氧 - 乙炔火焰枪烘烤。

② 主要脱漆、除锈方法　脱漆、除锈一般和粗化表面同时进行。

2）粗化表面　粗化表面常采用喷砂法进行。

① 喷砂方法

a）压入式喷砂法　利用压缩空气将磨料压入喷枪高速喷出打击工件表面而使表面粗化的方法。此法效率高并可和除油、脱漆、除锈同时进行，这种方法其磨料一般只使用一次，必要时也可人工回收，经筛选、清洗、干燥后再次使用。

b）无尘喷砂法　此法系一种能在喷射磨料时同时回收磨料的一种喷砂方法，磨料在喷砂工作时循环使用。一般适用于室内、舱内及其他封闭环境内工件的喷砂处理。采取无尘喷砂法必须首先对工件表面进行除油处理。

② 喷砂设备和喷砂磨料　喷砂设备一般为压入式喷砂机和便携式无尘喷砂机。喷砂磨料必须干燥、清洁，还必须有棱角，并且对空气污染小。压入式喷砂机一般选用铜渣砂磨料，无尘喷砂机一般选用破碎性小的金属磨料，粒度为 0.6 ~ 1.0 mm。

③ 喷砂表面粗化工艺规范

a）喷砂用压缩空气必须干燥，无油。

b）喷砂机喷嘴处空气压力为 0.6 MPa，并保证足够排气。

c）喷砂机喷嘴到基体表面距离为 100 ~ 300 mm。

d）磨料的喷射方向与基体表面法线之间夹角一般为 15°（不能超过 30°）。

3）活化表面　在喷砂粗化表面的同时，高速运动的砂粒也对基体表面进行切削，使基体表面露出新鲜金属，从而达到活化表面的目的。

（2）涂层设计

具体涂层设计是：电弧喷铝金属涂层 + 有机封闭涂料涂层 + 常规面层涂料涂层

1）涂层防腐理论分析

① 铝涂层与基体钢材有良好的结合强度，通过有机涂料对铝涂层进行封孔处理，可形成良好的隔离层，对腐蚀介质起隔离作用，从而保护基体钢材不受腐蚀。

② 铝涂层本身耐蚀性能较好，在海水中腐蚀率极低，再加上铝涂层的力学性能较好、耐磨损，耐冲击、不易破损，能长期保持涂层的完整性，从而保护基体钢材不受腐蚀。

③ 铝涂层具有比钢铁较低的电极电位，根据电化学腐蚀原理，一旦涂层破裂，涂层将通过牺牲自己（阳极）对基体钢材起电化学保护作用，从而使钢材不受腐蚀。

④ 有机涂层主要是通过隔离作用，使金属与腐蚀介质隔离开来，从而达到防腐的目的。

⑤ 根据最佳协同效应，喷铝后再涂封闭涂料和有机面层涂料，将大大提高抗腐蚀效果，其耐蚀性比单独喷涂金属涂层，或单独喷涂有机涂层的防护寿命之和高出 50% ~ 130%。

2）电弧喷涂金属涂层材料的选择　电弧喷涂金属涂层为达到良好的防腐效果，应满足以下条件。

① 金属涂层本身应具有良好的抗盐雾、抗海水腐蚀性能，其电极电位应低于钢铁的电极电位，以便能对钢铁基体起电化学保护作用。

② 金属涂层应具有良好的力学性能、有一定的强度、硬度、刚度和弹塑性，耐磨损、耐冲击，并与钢铁基体有良好的结合强度，以便能常久保持涂层的完整性。

③ 金属涂层应具有良好的工艺性能，易于喷涂，无毒、低污染及良好的经济性。

根据以上条件，我们重点研究了常用的铝涂层、锌涂层及锌铝伪合金涂层，对这三种涂层进行了电化学性能和力学性能实验。实验结果见表 9.4-3、表 9.4-4。

表 9.4-3　Al、Zn、Zn - Al 伪合金三种涂层在 3% NaCl 人造海水中的腐蚀电位和腐蚀电流

涂　层	腐蚀电位/V	腐蚀电流/$\mu A \cdot cm^{-2}$
Zn	- 1.38	150
Zn - Al 伪合金	- 1.30	100
Al	- 1.16	10



表9.4-4　Al、Zn，Zn-Al伪合金三种涂层与基体的结合强度和涂层的显微硬度

涂　层	结合强度/MPa	显微硬度 HV
Zn	9	22.9
Zn-Al伪合金	13	88.6
Al	18	41.2

注：基体为45钢，喷砂预处理。

由表9.4-3可见，三种涂层都具有比铁低的电极电位，能对钢铁起电化学保护作用。从腐蚀电流上看，Al涂层在海水中具有较低的腐蚀速率，与其他涂层相比，具有良好的抗海水腐蚀性能。美国焊接学会19年现场挂片腐蚀试验也充分证明了Al涂层较其他涂层有良好的抗海水腐蚀性能。

由表9.4-4可见，Al涂层具有较高的结合强度和较高硬度，能与基体牢固结合并具有良好的耐磨损、耐冲击性能，能长久保持涂层的完整性。

在喷涂工艺方面，喷铝时，铝熔滴能对金属表面起“净化”作用，有利于涂层与基体的结合，喷涂工艺性较好。另外，喷涂铝时烟雾的毒性较小，对人体无较大危害，安全性较好。

从经济上考虑，虽然铝比锌略贵，但由于铝比锌密度小，同样厚度的铝涂层材料消耗只是锌涂层的1/3，喷铝成本总的来说较低。

通过以上分析，确定Al涂层作为电弧喷涂金属涂层。

3）封闭涂料的选择　热喷涂层都不可避免地具有一定的孔隙率。Al涂层的孔隙率为10%左右，涂层的孔隙将为腐蚀介质提供通道，出现孔蚀现象。因此，应选择适当的封闭涂料对金属涂层进行封孔处理，以保证涂层对腐蚀介质具有良好隔离作用，以延缓腐蚀速度，提高涂层的防护寿命。对封闭涂料技术要求如下。

① 封闭涂料对涂层孔隙应具有足够的渗透能力，以保证封孔效果良好。

② 封闭涂料本身应具有良好的耐腐蚀性、耐老化性。

③ 封闭涂料不与金属涂层发生任何不良反应，此外，还应对金属涂层具有一定的钝化作用。

④ 封闭涂料应与常规面层涂料有良好的配套性，不影响常规面层涂料的正常涂装。

基于以上要求，我们研制了F-1改性环氧聚氨酯涂料作为喷涂层的封闭涂料。

F-1封闭涂料为双组分，具有渗透性好，附着力强、低温快干等特点，而且，F-1封闭涂料本身具有优良的防腐能力，并能对金属涂层起钝化作用。

F-1封闭涂料主要技术指标见表9.4-5。

表9.4-5　F-1主要技术指标

项　目	技术指标	检验标准
外观颜色	铁红色	GB 1729—1979
附着力	1级	GB 1720—1979
柔韧性	1 mm	GB 1731—1979
冲击强度	501 kg.cm	GB 1732—1979
硬度（摆杆法）	>0.3	GB 1730—1979
相对密度	1.25	GB 1756—1978
黏度（涂4#杯）	60~90 s	GB 1723—1978
干燥时间	表干2 h、实干24 h	GB 1728—1979

4）面层涂料的选择

经封闭处理的金属涂层表面再涂覆一层耐蚀性较好的面层涂料，将有助于进一步提高涂层对钢结构的屏蔽隔离效果，增强涂层的防腐性。同时，亦能满足舰船规定的着色要求。

面层涂料应满足一定的防腐性、装饰性和耐候性，还应与底层封闭涂料具有良好的配套性，以避免面层涂料对底层涂料的溶胀，而使面层涂料出现附着力差、涂层起泡等现象，从而影响整个复合涂层的防腐效果。

海洋船只常用的环氧沥青系列和氧化橡胶系列是专门研制的海洋用防腐涂料，具有优良的耐海水腐蚀性能，它们不会与F-1封闭涂料发生不良反应。

综上所述“电弧喷铝涂层+有机封闭涂料涂层+常规面层涂料涂层”所组成的复合涂层为最佳涂层设计。

（3）金属涂层制备

1）喷涂方式　采用电弧喷涂，通过直流电在两报线状金属喷涂材料之间发生电弧，由电弧加热的熔融部分经压缩空气雾化并由压缩空气射流喷射到基体表面上形成涂层。经表面预处理后的基体应尽快进行喷涂，其间隔时间愈短愈好。

① 在晴天及不大潮湿的天气，间隔时间不超过12 h。

② 在雨天、潮湿或合盐雾气氛下，间隔时间不可超过2 h，并且喷涂工作应在室内或干燥工棚中进行，严禁在露天进行。

③ 经表面预处理喷砂后，由于停留时间过长或其他原因致使基体表面明显变质时，应重新喷砂处理。

2）喷涂温度　喷涂时环境大气温度要高于5℃，或基体金属的温度至少比大气露点高3℃。

3）喷涂材料　喷涂材料为纯铝，铝的材质至少应达到GB 3190中的要求，即含铝量为99.5%以上。

4）喷涂设备　电弧喷涂设备：电弧喷涂设备由送丝机构、喷枪和喷涂电源三部分组成。

送丝机构应保证喷涂过程中进丝速度稳定，不致因送丝阻力的变化而导致进丝速度的明显改变。喷枪应保证丝材相交时良好对中并使丝材交点始终位于雾化气流中心。

喷涂电源应有良好的伏安特性，以便电弧燃烧稳定。

压缩空气供给系统：压缩空气供给系统由空气压瘤机、油水分离器、空气冷凝器和储气罐组成。此系统应保证压缩空气有足够的压力和流量，并保证无油、无水。

5）喷涂工艺参数　电弧喷涂主要工艺参数如下：

喷涂电压：32~34 V

喷涂电流：160~220 A

雾化空气压力：0.6~0.7 MPa

喷涂距离：150 mm

喷涂角度：70°~90°，垂直交叉喷涂8~4次，每次喷涂厚度为0.03~0.05 mm左右。喷涂总厚度0.12~0.15 mm。

（4）涂层后处理

涂层后处理包括封闭处理和常规有机面层涂料涂装。

1）封闭处理　采用F-1型或其他封孔剂，可采用手工涂刷、空气喷涂和无气喷涂，封闭层加工两遭，每道厚度0.03 mm，封闭层总厚度为0.06 mm。

2）常规有机面层涂料涂装　同船只常规面层涂料涂装工艺。

（5）经济效益分析

以某船为例，比较现有油漆涂层防腐与电弧喷铝涂层防腐这两种方案在15年内的防腐费用总消耗。

1）现有油漆涂层防腐重5年防腐费用总消耗在现有油漆涂层防腐体系下，某船每年的正常维护保养油漆消耗总量为1 080 kg，价值3.5万元，中、小修的油漆消耗总量为3 015 kg，价值10万元，坞修的油漆消耗约为两年的正常维护



保养油漆消耗量，价值5万元。

该船在现有油漆涂层防腐体系下，15年内需进行2次中修，2次小修，3次坞修。中修时还需对腐蚀严重的钢板进行换板处理。目前中修总费用为250万元，换板费用约占其中的20%，因此，中修时的换板费用为50万元。

该船在现有油漆涂层防腐体系下，15年内每年的具体腐蚀治理费用见表3。

总消耗 = 油漆材料费 + 换板费

= （10×5+5×3+3.5×8）+（50×2）= 193万元

以上消耗中没有包括油漆涂装时的工时费。

2）电弧喷铝涂层防腐15年防腐费用总消耗　该船的实船考核试验已经证明，进行电弧喷铝涂层的试验部位两年来基本上没有进行除锈涂漆处理，再根据理论分析和实验室的实验结果，我们可以对电弧喷铝涂层实行三年一次的小规模涂漆维护保养处理。费用按现有油漆涂层防腐体系下每年的正常维护保养油漆消耗量计算，油漆费用为3.5万元。

总消耗为 = 首次喷涂消耗 + 5次小规模维护保养消耗

= 20+3.5×5 = 20+17.5 = 37.5（万元）

由以上分析计算可得出，在15年内，采用电弧喷铝防腐比采用现有油漆防腐的腐蚀治理总费用要节省193－37.5 = 155.5（万元），电弧喷涂防腐的费用只是现有油漆防腐费用的37.5/193 = 19.4%。

由此可见采用电弧喷铝防腐的经济效益要远远优于现有油漆涂层防腐，5年内的腐蚀治理总费用不到现有油漆涂层防腐的1/5。

以上计算只是按现有不变价格计算，如考虑到5年内物价上涨因素，现有油漆涂层防腐的费用消耗将要更高，采用电弧喷铝涂层防腐的经济效益将更加显著。

根据以上分析可以得出。

采用电弧喷铝涂层对海洋船只钢结构进行防腐再制造延寿，比油漆涂层防腐具有优良的综合效益，其产生的经济效益都远远优于现有油漆防腐涂层。

4.2 油田储罐再制造延寿

据统计，全世界发达国家每年因腐蚀造成的损失价值约占这些国家国民生产总值的1%～4%。在石油化工行业中，腐蚀介质对生产储罐的破坏很大。我国石化行业的油田炼油厂和储运系统都建立了很多大型储油罐，仅石化系统各种类型储油罐就有5 000多座，油罐容积一般为0.5×10^4 m^3。此外在大庆油田大连港秦皇岛等地已建成5×10^5 m^3的大型储罐储油罐，设计使用寿命一般为20年。但由于储存的油品中含有机酸无机盐硫化物及微生物等杂质，使油罐因腐蚀而缩短了使用寿命。严重者1年左右就报废，如某油田579座油罐仅1986年1年就有215座出现穿孔现象。这种腐蚀穿孔不仅泄漏油品，造成能源浪费和环境污染，甚至可酿成火灾爆炸等事故。因此，必须采取有效的防护措施对储油罐加强防腐处理，确保油田安全生产。与此同时，也需要将很多失效报废储罐进行再制造处理以恢复其功能，做到不破坏生态环境，减少资源浪费，减少停产，同时又能对服役期满的储罐进行再制造利用。

目前国内外储罐大部分采用非金属涂料进行防腐，要求涂料本身耐腐蚀性能好，透气性渗水性小，有良好的附着力和机械强度。在涂装时要对罐体做除锈除垢的表面处理，还要控制涂装厚度大于临界厚度，涂装现场的温度湿度等环境因素和涂料的涂装间隔才能满足储罐的防腐性能。此外由于涂料构成的组分多，决定了其防腐性能的局限性，尤其是在强腐蚀介质中防腐寿命较短。因此，需要寻求新的储罐防腐再制造延寿技术。

而再制造工程是充分利用各种先进表面工程技术和其他成形技术，对废旧装置进行修理和改造，制成再制造产品，创造新的价值，实现优质、高效、低成本、少污染的绿色技术。针对石油化工系统储油罐腐蚀日益严重的现状，再制造技术为我们提供了一个全新的解决方案。大庆油化焊接研究所对储油罐的腐蚀问题进行了大量深入地研究，申报了碳钢罐薄壁不锈钢衬里及其制造方法（ZL98117268.7）、金属罐不锈钢衬里（ZL97224849.8）、非金属罐（管道）防护层（ZL97248447.7）等多项专利，研究出金属罐非金属罐不锈钢防腐衬里系列产品（技术）。

采用金属罐薄壁不锈钢衬里技术对油田储罐进行再制造修复延寿，增强了防腐性能，延长了使用寿命，通过近几年在油田中实际应用，取得了良好的经济和社会效益。

薄壁不锈钢衬里技术是根据储罐存储介质的腐蚀性、承受的压力温度和储罐的容积，选择衬里的不锈钢型号与规格，针对不同储罐的结构附件及储罐壁材质，通过设计与计算，确定在储罐内壁上特殊接头的形式与分布位置，利用特殊接头将衬里固定在储罐的内壁上形成不锈钢防腐层。

（1）储罐不锈钢衬里结构

金属罐与非金属罐衬里是采用厚度为0.21～1 mm的薄壁不锈钢板，用焊接工艺方法将其周边固定在罐体内壁预先布置的特殊接头上，由特殊接头将各部分衬里连成一个全封闭的、非紧贴式的、长效的薄壁不锈钢防腐空间，使储罐防腐层的附着力物理力学性能和施工性能得到了提高。其结构如图9.4-9所示。



图9.4-9　储罐不锈钢衬里结构

（2）薄壁不锈钢衬里特点

利用金属防腐材料防腐，其寿命长、价格适宜、性能价格比高、维护费用低，属于对介质无环境污染的绿色防腐工程。

用焊接工艺技术完成防腐工程施工。直接把不锈钢焊接到罐体上，不老化、不脱落，防腐寿命长达20～30年。

防腐质量可靠，防腐层厚度易检验，薄壁不锈钢厚度规范（0.2～0.4 mm）均匀一致。只要焊缝严密就防腐，焊接工艺可靠，防腐质量有保证。

防腐性能价格比高，经济上合理。衬里罐比纯不锈钢罐的价格低70%，节约基建投资。比涂料防腐一次性投资较大，但长期运行费用低。

金属罐不锈钢衬里适用于油、气、水储罐的内衬防腐。用于油田三元复合介质储罐可节约70%建罐投资；用于水罐可防止水质污染，提供无二次污染的水；用于旧罐维修节约投资50%，只要在里罐报废前，就可用不锈钢衬里修复，比厚碳钢罐还耐用。

（3）薄壁不锈钢衬里技术的应用

1）金属罐与非金属罐不锈钢衬里技术是一种新型储罐再制造技术。通过对旧储罐实施薄壁不锈钢衬里技术，提高了原储罐的表面工程标准和再制造产品质量，提高储罐防腐等级。因此，它使旧储罐恢复原有功能，并延长了使用寿命，从而形成再制造产品。在对新、旧储罐进行衬里的施工及存储介质时，对环境和介质均达到几乎零污染的程度，优化资源配置，提高了资源利用率，做到投入少（50%左右）、产出高（新罐的水平和利用价值），所以薄壁不锈钢衬里专利技术是对先进的储罐再制造技术的补充和发展。

2）薄壁不锈钢衬里技术经济分析　大庆油化焊接研究所设计了50～10^5 m^3标准不锈钢衬里储罐（参见表9.4-6），



并实施多个油水储罐衬里工程。在大庆油田已完成50余座金属与非金属不同容积储罐的不锈钢衬里，完成投资800多万元。实践证明，再制造工程在储罐防腐领域里有非常广泛的应用前景。

表9.4-6　不锈钢衬里金属罐系列主要数据表

储罐编号	公称容积/m^3	直径/m	高度/m	衬里总面积/m^2
衬里罐-50	50	4	4	75.5
衬里罐-70	70	4.5	4.5	95.6
衬里罐-102	10^2	5.33	5.96	143.2
衬里罐-135	135	5.6	5.8	152.7
衬里罐-150	150	6	6.3	177.04
衬里罐-215	215	6.6	6.8	210.9
衬里罐-500	500	8.92	8.92	377.4
衬里罐-103	10^3	12	11.07	659.95
衬里罐-2103	2×10^3	15.86	14.57	1 029.5
衬里罐-5103	5×10^3	22.7	16.24	1 966.6
衬里罐-104	10^4	30.5	17.39	3 126.1
衬里罐-5104①	5×10^4	60	21	3 965.4
衬里罐-105①	10^5	80	22	5 024

①　与储缺罐结构有关

采用薄壁不锈钢衬里技术对旧油罐进行修复能创出巨大的经济效益。以大庆油田旧罐修复1 000 m^3储罐为例。在4座使用15年以上接近报废的储水罐上进行不锈钢衬里再制造技术处理，花费投资22~23万元/座，其性能就能与新罐相近，可再用20年。如果建造新罐需投资40~50万元/座，不锈钢衬里储罐可节约40%~50%的投资，效益显著。

在石油、化工工程中，有许多是纯不锈钢罐，有了薄壁不锈钢衬里的再制造技术，就可用碳钢为基体加上不锈钢衬里罐来代替。大庆油田某化学注入装置有26座罐，如果采用纯不锈钢罐需投资1 200万元左右，实际采用不锈钢衬里罐只用530万元就完成了工程制造，节省投资670万元，节约率60%左右，经济效益较好。

薄壁不锈钢衬里技术的社会效益也相当显著。薄壁不锈钢衬里技术可以形成新的产业，吸收专业技术人员和工人就业创造价值，迅速形成新的经济增长点。

4.3　绞吸挖泥船绞刀片再制造技术及应用

绞吸挖泥船是我国疏浚作业的主要船型，绞刀片是其主要的过流易损部件之一。绞刀片通常焊接于刀架上使用，分为前、中、后三段。由于焊接性的要求，其耐磨性受到限制。经过对“吸扬14号”1 750 m^3/h绞吸式挖泥船绞刀片青岛工地运行情况进行了调研。该船原使用闭式加厚前段绞刀片，材质为ZG35SiMn，质量104 kg。调研结果表明：前、中、后三段绞刀片磨损程度基本上为3:2:1，前段绞刀片磨损最为严重，在该工地土质主要为粗砂、板结黏土工况下，ZG35SiMn前段绞刀片磨损至刀齿根部（剩余质量17 kg左右）其疏浚方量为119 631 m^3（全寿命为266.15 h）。更换绞刀片一般需2~3 d时间，且安装过程危险，劳动强度大，其间挖泥船主机处于空耗状态。可见：绞刀片在疏浚挖泥时受到严重的泥沙磨粒磨损作用，寿命短、更换频率高，工作效率低，严重制约了挖泥船整体效益的发挥。

绞刀片再制造技术是采用新设计、新材料、新工艺的特殊制造技术，解决原绞刀片耐磨性与焊接性的矛盾，在提高绞刀片寿命的同时，又利于绞刀片的再制造，可充分发挥资源效益。绞刀片的再制造过程从绞刀片的全寿命周期费用最小；具有可再制造性；再制造的成本、环境及资源负荷最小等易损件再制造的基本原则出发，对位于绞吸挖泥船绞刀架前端、工作时首先接触泥沙、吃泥深度及工作负荷最大、磨损最为严重的前段绞刀片进行了再制造研究。

（1）绞刀片再制造设计与再制造工艺

1）绞刀片再制造设计　绞刀片挖泥作业时的磨损规律是绞刀片刀齿沿一定的角度逐渐磨损变短。随着刀齿的磨损变短，疏浚效率降低，刀齿磨完后，开始磨损刀体，绞刀片对绞刀架失去保护，刀架开始磨损，此时应对绞刀片予以更换。由此可见：提高绞刀片刀齿的耐磨性和使用寿命是绞刀片再制造技术的关键。再制造设计时既要考虑绞刀片所用材料的耐磨性等使用性能，还要考虑其再制造工艺性。采用常规单一材料，要满足这些要求是十分困难的，如材料要耐磨，一般焊接性就非常差，而且塑、韧性也很差。

反之，满足了绞刀片的焊接性、塑性和韧性的要求，其耐磨性又受到限制。笔者根据绞刀片不同的工况条件及对其性能要求，对绞刀片的刀齿与刀体采用不同材料和工艺分别设计和制造，通过焊接的方法将刀齿和刀体连接成一体。刀齿磨完后仅更换新刀齿而无须更换整个绞刀片，其再制造性能得以改善。

①　刀齿再制造设计　刀齿首先应具有高的耐磨性，以提高使用寿命，并保证高的挖掘效率。同时保证刀齿与刀体具有良好的焊接性能，在工作时不被折断。综合绞刀片的工作环境、再制造性、耐磨性、工作效率及制造成本费用等因素，刀齿基体选用ZG35SiMn材料铸造成形，该材料可满足对刀齿焊接性能和力学性能及制造工艺性能的要求。在刀齿基体上采用焊接的方法制备特种耐磨层，提高其抗磨粒磨损能力和使用寿命。刀齿可设计成图9.4-10所示的不同结构形式。它由基体和耐磨层组成，按刀齿基体形状特征可划分为4种基本结构形式（见图9.4-10），每种结构形式各有其特点。

U形结构（图9.4-10a、b、e）对耐磨层有较强的力学支撑作用，可有效防止刀齿耐磨材料的折断。

E形结构（图9.4-10c）对耐磨层的力学支撑作用比U形结构更强，但不适合于堆焊方式制备耐磨刀齿。

L形结构（图9.4-10d）对耐磨层的力学支撑作用比U形结构弱，但结构较U形结构简单，在低应力工况下工作的绞刀刀齿可用此结构。

T形结构（图9.4-10f）对耐磨层的力学支撑是依靠刀齿中心的基体隆起。较适合于采用堆焊及表面熔覆的方法制备耐磨层。

针对1 750 m^3/h绞吸挖泥船青岛工地工况特点，选用U形结构采用梯度耐磨堆焊的再制造方法，较好的解决了这一问题。刀齿部位的成分和性能具有一定的梯度变化，大大降低了刀体和刀齿间的成分和性能突变产生的焊接应力和相变应力，同时保证了刀齿兼有强韧性和高的耐磨性及刀齿工作的可靠性。采用梯度堆焊的再制造方法工艺简单，成本低，刀体与刀齿整体性强，刀齿性能易于保证，使传统绞刀片整体更换转化为局部刀齿更换，节约了资源，并且刀齿的更换过程更加快捷、方便、安全。刀齿设计（见图9.4-11）采用了适当的耐磨层厚度以提高刀齿的使用寿命及抗折断能力。刀齿前端耐磨堆焊层总厚度设计为50 mm，采用三种成分和性能不同的耐磨堆焊材料进行梯度化堆焊，即过渡耐磨堆焊层（厚度为10 mm）、高耐磨堆焊层（厚度为20 mm）和陶瓷复合耐磨堆焊层（厚度为20 mm）。



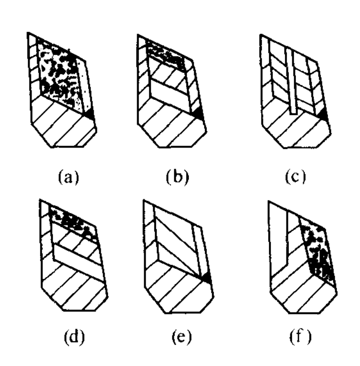


图 9.4-10 再制造绞刀刀齿头部结构
(a) 金属基陶瓷复合材料 U 形结构；(b) 梯度耐磨堆焊 U 形结构；
(c) 金属基陶瓷复合材料 E 形结构；(d) 梯度耐磨堆焊 L 形结构；
(e) 均匀耐磨堆焊 U 形结构；(f) 金属基陶瓷复合材料 T 形结构

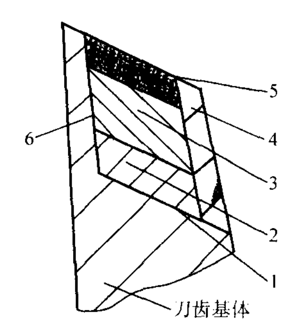


图 9.4-11 再制造绞刀片刀齿
1、6—打底层焊缝；2—过渡耐磨堆焊层；
3—高耐磨堆焊层；4—成形板；5—陶瓷复合耐磨堆焊层

在刀齿基体上采用碱性焊条打底，堆焊 4 ~ 5 层，形成一个韧性和抗裂性优异的改性基体表面，该表面作为耐磨堆焊层的起焊面。过渡耐磨堆焊层是打底层焊缝与高耐磨堆焊层之间的过渡层，采用自制的韧性及抗裂性能较好的低合金耐磨焊条堆焊；高耐磨堆焊层具有较高的硬度和耐磨性，该层采用自制的高合金耐磨焊条堆焊；陶瓷复合耐磨堆焊层是金属基 WC 陶瓷颗粒增强复合耐磨材料，具有优异的耐磨性能。

② 绞刀片刀体设计 绞刀片刀体是焊接在刀架上使用的，绞刀挖泥时，刀体受到较大应力作用，且在泥流中运行，因此要求刀体材料具有良好的焊接性、强度和韧性，又具有一定的耐磨性。综合对刀体的性能要求以及刀体不规则曲面难以机加工的特点，选用 ZG35SiMn 作为绞刀片的刀体材料，铸造成形。该材料综合力学性能良好，具有良好的铸造工艺性能且成本低廉。

2）绞刀片再制造工艺及组织性能 刀齿耐磨层堆焊时考虑到稀释率的影响，采用小规范多层多道堆焊以减小焊缝的熔合比和焊接应力。绞刀片刀齿再制造工艺过程如图 9.4-12 所示。

待再制造刀齿基本磨完时，清理其残余部分，更换新的再制造刀齿。

（2）再制造绞刀片的工程应用

1）再制造绞刀的工程应用 研究开发的再制造绞刀于 2000 年 12 月 2 日安装在 1 750 m^3/h 绞吸挖泥船（吸扬 14 号），用于青岛填海造地工程。截止 12 月 17 日工程完工，共完成疏浚方量 68 220 m^3，累计工作 98.6 h，工况主要为粗砂、板结黏土等。对再制造绞刀在上述工地应用时的磨损情况进行了 4 次测试，表 9.4-7 为研制的再制造绞刀片疏浚方量与磨损量关系。

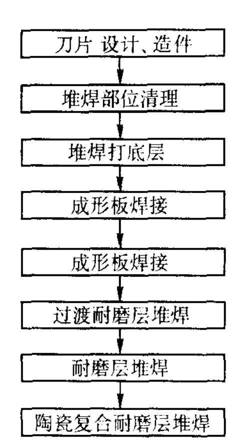


图 9.4-12 绞刀片刀齿再制造工艺流程

表 9.4-7 再制造绞刀片磨损量

项 目	第 1 次测量	第 2 次测量	第 3 次测量	第 4 次测量
对应累计工作时间/h	17.2	43.3	66.3	98.6
对应累计疏浚方量/m^3	9 650	26 400	41 620	68 220
对应累计刀齿磨损高度/mm	5.3	11	15.3	19.3
对应累计刀齿磨损质量/kg	0.69	1.35	1.86	2.41

2）再制造绞刀片工程应用效果 目前国内普遍采用的是 ZG35SiMn 刀片，正火态使用，硬度为 HBS170 ~ 220。根据吸扬 14 号挖泥船提供的 ZG35SiMn 绞刀片使用数据和研制的再制造绞刀片同一工地应用实测数据，得出表 9.4-8 所列对比分析结果。

表 9.4-8 再制造刀片与原 ZG35SiMn 绞刀片性能对比

性能指标	研制再制造绞刀刀片	原 ZG35SiMn 绞刀片
刀片质量/kg	78.6	104
平均疏浚效率/$m^3 \cdot h^{-1}$	691.9	449.5
质量磨损率/$kg \cdot h^{-1}$	0.024	0.327
单位方量质量磨损率/$kg \cdot m^{-3}$	0.35×10^{-4}	7.27×10^{-4}
平均刀齿单位质量疏浚方量/$m^3 \cdot kg^{-1}$	28 307	1 375
刀齿比磨损质量/kg·$(m^3 \cdot h)^{-1}$	0.352×10^{-4}	7.725×10^{-4}

表 9.4-8 表明：再制造绞刀片质量减轻 24.4%，疏浚效率提高 54%；ZG35SiMn 绞刀片刀齿平均质量磨损率是再制造绞刀片刀齿的 13.6 倍；再制造绞刀片平均单位刀齿质量疏浚方量是原 ZG35SiMn 绞刀片的 20.6 倍。

刀齿的比磨损质量（单位时间单位疏浚方量刀齿的磨损质量）是反映绞刀片耐磨性与疏浚效率综合性能的重要指标，刀齿的比磨损质量越小其综合性能越优异。再制造绞刀片刀齿比磨损质量是 ZG35SiMn 绞刀片的 4.56%，具有优异的综合性能。

由此可见，再制造绞刀片可有效提高绞吸挖泥船的连续疏浚作业能力和整船设备利用率及生产效率、减少停机损失、降低疏浚成本。同时研制绞刀片的质量大大减轻，更换绞刀片更加安全、方便和快捷，具有良好的综合经济效益和社会效益。

4.4 发酵罐内壁火焰喷涂塑料再制造延寿应用

某葡萄酒厂低温发酵车间的 16 个发酵罐是采用一般不



锈钢板焊接而成的，使用后发现发酵罐内壁出现点状腐蚀，并导致酒中铁离子超标，影响了产品的质量，只能存放中、低档葡萄酒。为了解决内壁防腐蚀问题，该厂曾采用过环氧树脂涂料涂刷工艺，但使用一年，涂层大片脱落，尤其罐底部，涂层几乎全部脱落。在该车间进行技术改造时，为了防止酒罐内壁继续腐蚀及铁离子渗出问题，要求内壁涂层材料无毒，无味，不影响葡萄酒质量，具有一定的耐酸性和耐碱性，涂层与罐壁结合良好，使用中不得脱落。涂层最好与酒石酸不粘或粘后易于清除，表面光滑，具有一定的耐磨性。采用现场火焰喷涂塑料涂层对葡萄酒罐进行保护，取得了良好的效果。

（1）涂层材料的选择

根据低温发酵罐工作情况及厂方的要求，我们选择了白色聚乙烯粉末做葡萄酒罐内壁涂层材料。

（2）火焰喷塑工艺

1）喷涂设备及工艺流程　聚乙烯粉末火焰喷涂使用塑料喷涂装置，包括喷枪、送粉装置等。工艺流程为：喷砂—预热—喷涂—加热塑化—检查。

2）喷砂预处理　在喷涂塑料前，采用压力式喷砂设备，使用刚玉砂处理。

3）表面预热　基体表面预热的目的是除去表面潮气，使熔融塑料完全浸润基体表面，从而得到与基体的最佳结合。通常将基体预热至接近粉末材料的熔点。

4）喷涂　葡萄酒罐内壁火焰喷塑施工采用由上到下的顺序进行，即顶部—柱面—底部。在经预热使基体表面温度达到要求后，即可送粉喷涂。喷涂时，应保持喷枪移动速度均匀、一致，时刻注意涂层表面状态，使喷涂涂层出现类似于火焰喷熔时出现的镜面反光现象，与基体表面浸润并保持完全熔化。火焰喷涂聚乙烯涂层的喷涂参数见表9.4-9。

表9.4-9　葡萄酒发酵罐内壁喷涂参数

喷涂材料	氧气压力/Pa	乙炔压力/Pa	空气压力/Pa	距离/mm
聚乙烯	1～2	0.5～0.8	1	150～250

5）加热塑化　喷涂聚乙烯涂层，由于聚乙烯熔化缓慢，涂层流平性略差，因此在喷涂后，需用喷枪重新加热处理或者喷涂后停止送粉使涂层完全熔化，流平后再继续喷涂。加热时，应防止涂层过热变黄。

6）涂层检查　在喷涂过程中及喷涂完一个罐后，对全部涂层进行检查，主要检查有否漏喷，表面是否平整光滑和机械损伤等可见缺陷，然后进行修补。葡萄酒罐装酒前经酸液和碱液消毒清洗，再进行检查。对查出结合不良的部位进行修补。

再制造工程是一个具有广阔发展前景的新兴研究领域和新兴产业，其是根据我国废旧产品进行科学的资源化需求提出的，具有较强的学科创新性、前瞻性以及广阔的应用与发展前景。中国工程院目前设立了《废旧机电产品资源化》咨询项目，主要研究我国废旧机电产品资源化的途径和关键技术。

再制造的核心是保证再制造产品的质量。目前我国进口设备资产已达到几千亿美元，每年由于磨损使零部件失效，需花数十亿美元补充备件。世界钢铁年产量约7亿吨，因腐蚀消耗掉的就有1.4亿吨。据工业发达国家的统计，每年仅因腐蚀造成的损失就占国民生产总值的4%。由此可见，产品的失效形式主要包含表面的磨损、腐蚀等，集中表现为零件表面的减量、变质、变性等方式。如果能够提高产品的表面综合性能，则能够显著地提高产品的寿命。

通过在焊接钢结构中采用再制造技术进行延寿，能够显著地发挥钢结构产品的最大效益，延长产品寿命，并提高产品性能。

编写：朱　胜（装甲兵工程学院）
徐滨士（装甲兵工程学院）
姚巨坤（装甲兵工程学院）



参考文献

1 霍立兴．焊接结构工程强度．北京：机械工业出版社，1995

2 张玉凤等．接头中焊缝断裂韧性的概率方法评定．焊接学报，1990，11（4）

3 霍立兴等．焊接压力容器的大型试验及评定准则的研究．机械工程学报，1991，27（6）

4 霍立兴，陈书泉．CF60钢焊接接头东台撕裂试验研究．天津大学学报，1991，No3

5 张玉凤等．断裂试验数据的概率统计分析．机械强度．1990，No4

6 Huo Lixing，Zhang Yufeng。Influence of Weldmatching on Mechanical Behaviours，Mechanical Effects of Welding．Springer－Verlag Berlin Heidelberg，1992

7 Huo Lixing et al．Investigaion on Fracture Parameters and Assesement Criteria for Welded Pressure Vessels．IIW Doc X－1204－90

8 BS7448：Part2：1997 Method for determination of K_{IC}，critical CTOD and critical J values of welds in metallic material

9 BS7448：Part 1：1991，Fracture mechanics toughness tests．Part 1．Method for determination of K_{IC}，critical CTOD and critical J values of metallic materials

10 霍立兴等．焊接接头安全评定的断裂参量研究．机械强度．1995，No2

11 A Ohta，Osamu Watanabe．Fatigue strength improvement of box welds by low transformation temperature welding wire and PWHT．Welding in the World，2000，44（3）：52～58

12 Miki C，Anami K，Tani H．Fatigue strength improvement methods by treating the weld toe．Welding journal，1999，13（10）：795～803

13 Wang，W．X．，Huo，L．X．，Zhang，Y．F．，Wang，D．P．，2002．New developed welding electrode for improving the fatigue strength of welded joints．Journal of Materials Science and Technology，18（6）：275～279

14 王文先，霍立兴，张玉凤，王东坡等．相变应力及其改善焊接接头的疲劳强度．机械工程学报，2002，38（10）：65～68

15 霍立兴、王东坡等，改善焊接接头疲劳强度超声冲击方法的实验研究，机械工程学报，2000，36（4）：115～120。

16 王东坡、霍立兴等，提高焊接接头疲劳强度的超声波冲击方法，焊接学报，1999，20（3）：158～163．

17 Huo Lixing Wang Dongpo，Investigation on Improving Fatigue Properties of Welded Joints by Peening Method，Welding In the World，2001，45（3/4）：12～16．

18 王东坡、霍立兴等，改善焊接接头疲劳强度超声冲击装置的研制，焊接学报，2000，21（2）：32～35．

19 Huo Lixing，Wang Dongpo，Investigation on Improving Fatigue Properties of Welded Joints by Ultrasonic Peening Method，Key Engineering Materials Vols．183－187（2000）：1315～1320．

20 王东坡、霍立兴等，咬边缺陷对超声冲击处理焊接接头疲劳性能的影响，航空学报，2001，24（2）：183～187。

21 薛锦，应力腐蚀破裂与环境氢脆，西安：西安交通大学出版社，1991

22 乔利杰，褚武扬，应力腐蚀破裂，北京：科学出版社，1993

23 潘希德，董俊明，薛锦，J_M积分在低碳钢焊接接头应力腐蚀破裂设计中的应用，西安：西安交通大学学报，1996，30（7）：104～110

24 周光祺，张震，董俊明，用插销法研究0Cr18Ni9Ti不锈钢在$MgCl_2$溶液中的应力腐蚀破裂，第六届全国焊接学术会议论文选集，第5集，西安，1990

25 ASTM Designation：G58－85，Standard practice for preparation of stress－corrosion test specimens for weldments

26 李志远，林兆凤，刘顺洪，热模拟焊接热影响区组织在3.5%NaCl水溶液中的腐蚀疲劳裂纹行为的研究，第六届全国焊接学术会议论文选集，第5集，西安，1990

27 范长信，雷中黎，赵彦芬等，汽轮机末级叶片术蚀后的焊接修复，全国第五届电站金属构件失效分析与寿命管理学术会议论文集，1997，293～301

28 集箱用12Cr1MoV钢手工焊焊接接头高温持久强度试验，上海锅炉厂，1990

29 集箱用12Cr1MoV钢埋弧焊焊接接头高温持久强度试验，东方锅炉厂，1990

30 12Cr1MoV和12Cr2Mo低铬铁素体锅炉用耐热钢管，上海锅炉厂，1990

31 高强度铁素体锅炉用耐热钢9Cr1MoVNb，上海锅炉厂，1990

32 陶永顺，杨春乐，史耀武，改良型9Cr－1Mo钢焊接工艺及在电站锅炉上的应用，东方电气评论，1995，9（4）：199～211

33 潘希德，薛锦，焊接质量差引起的不锈钢设备应力腐蚀开裂，腐蚀科学与防护技术，1997，12

34 刘树涛，李耀君，10吨汽包裂纹原因分析，全国第五届电站金属构件失效分析与寿命管理学术会议论文集，1997，192～203

35 米锡敬，孙永莹，电站锅炉汽包裂纹分析及探伤要点，全国第五届电站金属构件失效分析与寿命管理学术会议论文集，1997，702～703

36 徐滨士，朱绍华等．表面工程的理论与技术．北京：国防工业出版社，1999

37 杜学铭，施雨湘，李爱农，张建强．绞吸挖泥船绞刀片再制造技术及应用研究．武汉理工大学学报（交通科学与工程版），2002，26（1）：4～7

38 徐滨士，马世宁，刘世参等．绿色再制造工程设计基础及其关键技术，中国表面工程，2001，（2）：12～16

39 罗震，单平，易小林，侯贤忠．油田储罐再制造技术的研究与应用．中国表面工程，2001，（2）：40～42

40 朱胜，徐滨士，姚巨坤．再制造设计基础及方法．中国表面工程，2003，（3）：27～31

41 徐滨士等．绿色再制造工程及其在我国的应用前景．工程科技与发展战略咨询报告集，中国工程院，2002

42 朱胜，姚巨坤．再制造工程的巨大效益．新技术新工艺，2004，（1）

43 姚巨坤，向永华，朱胜．再制造工程的内涵及哲学意义．中国资源综合利用，2003，（8）：7～9

44 朱绍华，刘世参，朱胜．谈绿色再制造工程的内涵及学科构架．中国表面工程，2001，（2）：5～8

45 姚巨坤，朱胜，崔培枝．再制造管理－产品多寿命周期管



理的重要环节. 科学技术与工程, 2003, 3 (4): 374 ~ 378

46 Steinhilper, R. Remanufacturing: The Ultimate Form of Recycling. Fraunhofer IRB Verlag, 1998

47 R Giuntini, K Gaudette. Remanufacturing: The Next Great Opportunity for Improving U.S. Productivity. OEM product - services Institute, 2003

48 W Kerr, C Ryan. Remanufacturing and Eco - Efficiency: A Case Study Of Photocopier Remanufacturing at Fuji Xerox Australia. Journal of Cleaner Production. 2001. (9). p: 75 ~ 81

49 Lund, R T. The Remanufacturing Industry: Hidden Giant. Boston University, Boston, MA, 1996.

50 Bert Bras and Mark W. McItosh. Product, process, and organizational design for remanufacture - an overview of research. Robotics and Computer Integrated Manufacturing. 1999, (15): 167 ~ 178